

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

СТУПНИЦЬКИЙ ВАДИМ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 658.511.4:621.7

**НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ
ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
МАШИНОБУДУВАННЯ ЗАСОБАМИ ПАРАЛЕЛЬНОГО
ІНЖИНІРИНГУ**

05.02.08 – *технологія машинобудування*

Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант –
доктор технічних наук,
професор **Грицай І.Є.**

Львів – 2015

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. Сучасний стан технологічного забезпечення інтегрованих систем автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва та розробки методів прогнозуючого моделювання процесів механічного оброблення виробів.....	14
1.1. Особливості та тенденції розвитку інтегрованих CAD/CAE/CAPP/CAM систем та PLM технологій в машинобудуванні	14
1.2. Концептуальні проблеми проектування та дослідження об'єктно-орієнтованих та функціонально-орієнтованих технологічних процесів	32
1.3. Огляд сучасних методів імітаційного моделювання процесів формоутворення деталей в машинобудуванні	43
1.4. Аналіз сучасних методів прогнозування якості життєвого циклу виробів на етапі технологічної підготовки машинобудівного виробництва	56
1.5. Мета і основні завдання дисертаційної роботи.....	68
РОЗДІЛ 2. Методологія функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів в машинобудуванні	70
2.1. Структура та особливості використання автоматизованої технологічної системи формоутворення (CAF-системи), як основи синтезу функціонально-орієнтованих технологій	70
2.2. Методика комп'ютерно-імітаційного (реологічного) моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану матеріалу заготовки в зоні різання на основі теорії скінчених елементів.....	76
2.2.1. Механіка дислокацій при різанні та моделювання процесів руйнування та пластичного деформування виробів методами скінчених елементів	79
2.2.2. Аналіз та вибір критерію локального руйнування при різанні	101
2.3. Методика імітаційного реологічного МКЕ моделювання процесу формоутворення деталей різанням.....	113
2.4. Висновки розділу 2.....	126

РОЗДІЛ 3. Методологічні дослідження технологічних переходів формоутворення деталей в САФ-системі (Computer Aided Forming System) ...	131
3.1. Аналіз впливу силових чинників технологічних переходів механічного оброблення деталей на напружено-деформований стан заготовки в зоні формоутворення методом скінченних елементів	131
3.2. Аналіз формування силового та напружено-деформованого стану при обробленні деталей з найбільш репрезентативних машинобудівних матеріалів	137
3.2.1. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з конструкційних сталей на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей	136
3.2.2. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з легованих сталей на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей	138
3.2.3. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з алюмінієвих сплавів на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей	140
3.2.4. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з жароміцних сталей та сплавів конструкційних сталей на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей формоутворення	142
3.2.5. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з титанових сплавів на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей	147
3.3. Аналіз залежності технологічних параметрів різання від переднього кута різального клина на основі реологічного моделювання	151
3.4. Аналіз результатів імітаційного (реологічного) моделювання щодо впливу температурних чинників на стан поверхонь в процесі їх формоутворення	161
Висновки до розділу 3	178

РОЗДІЛ 4. Технологічні основи формування параметрів мікрогеометрії та якості поверхонь деталей машин деталей як результат роботи автоматизованої технологічної системи формоутворення	186
4.1. Дослідження моделі формування мікронерівності поверхні з урахуванням пластичної течії матеріалу	187
4.1.1 Концептуальна модель формування основних параметрів мікротопології поверхонь	187
4.1.2. Математичне моделювання вібраційної складової мікронерівності поверхні в процесі її формоутворення	192
4.1.3. Визначення деформаційної складової параметру шорсткості із застосування методів реологічного імітаційного моделювання	206
4.2. Реологічна модель формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару заготовки при обробленні різанням	214
4.2.1. Реологічне моделювання та аналіз впливу технологічних чинників на формування залишкових напружень I роду	217
4.2.2. Реологічне моделювання та аналіз впливу технологічних чинників на формування залишкових напружень II роду	228
4.3. Моделювання залишкових деформацій, що формуються в результаті виконання технологічного переходу лезового оброблення деталі	238
4.4. Експериментальні дослідження залишкових напружень та деформацій методом ультразвукової акустичної тензометрії	246
4.4.1. Мета та постановка задачі експерименту	246
4.4.2. Опис методики експериментальних акустотензометричних досліджень	248
4.4.3. Планування та опрацювання результатів експериментальних досліджень	252
Висновки до розділу 4.....	261
РОЗДІЛ 5. Структурно-параметрична оптимізація функціонально-орієнтованого технологічного процесу	267

5.1. Математичне моделювання основних експлуатаційних властивостей (реакцій) функціональних поверхонь трибомеханічних систем з врахуванням технологічних чинників	267
5.1.1. Математична модель зносостійкості функціональних поверхонь виробу з врахуванням технологічних чинників	274
5.1.2. Математична модель втомної міцності з врахуванням конструкторсько-технологічних чинників	286
5.1.3. Математична модель корозійної стійкості з врахуванням технологічних чинників	289
5.1.4. Математична модель мастильної утримуючої здатності функціональних поверхонь виробу з врахуванням технологічних чинників	295
5.2. Постановка задачі та методика структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу	299
5.3. Математично-логічний апарат та узагальнений алгоритм структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу	312
Висновки до розділу 5.....	332
РОЗДІЛ 6. Узагальнений приклад формування та структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу	338
6.1. Вихідні дані на проектування	339
6.2. Імітаційно-аналітичний аналіз впливу технологічних чинників на напружено-деформований та структурно-фазовий стан функціональних поверхонь деталей прес-форм	347
6.3. Структурно-параметрична оптимізація функціонально-орієнтованого технологічного процесу оброблення виштовхувача прес-форми	367
Висновки до розділу 6.....	379
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	386
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	391
ДОДАТКИ.....	424

ВСТУП

Актуальність теми. Впродовж останнього десятиліття головним чинником економічного зростання промислово розвинених країн стало розроблення та впровадження інтегрованих інформаційних систем керування наукомісткими виробничими процесами. В сучасних машинобудівних САПР системно інтегровані CAD/CAE/CAPP/CAM програмні продукти та реалізовано створення безпаперової інтерактивної системи документообігу в єдиних уніфікованих форматах та прототипах репозиторія даних.

У цих інтегрованих системах підготовки машинобудівного виробництва використовується загальноприйнятий алгоритм автоматизованого технологічного проектування, що передбачає виконання ряду послідовних взаємопов'язаних етапів безітераційного низхідного структурно-параметричного синтезу засобами формальної ревалентності за допомогою алгоритму прототипування. На основі вхідних даних (як результат роботи CAD і CAE-систем: макрогеометрична конфігурація деталі, матеріал, її розмірно-вагові характеристики, точність геометричних розмірів та взаєморозташування поверхонь, фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі, тип та організаційна форма виробництва) в базі даних шукається ревалентний конструктивно-технологічний прототип виробу на основі якого формується маршрут механічного оброблення, потім коректується структура технологічних операцій, переходів, призначаються режими оброблення (CAPP-система), а відтак проектується або підбирається технологічне оснащення, інструмент, складається програма для верстатів з ЧПК (CAM-система). При цьому технолог (або автоматизована технологічна система) ***повністю абстрагується від проблем функціонального (експлуатаційного) характеру об'єкту виробництва***, справедливо вважаючи, що призначення вихідних даних та граничних умов для технологічного проектування – це прерогатива конструктора (або автоматизованої CAD/CAE системи). Саме такий технологічний процес в класифікаційному контексті забезпечення поставленої мети можна вважати об'єктно-орієнтованим.

Проте забезпечення основних експлуатаційних властивостей виробу (зносостійкості, втомної міцності, мастилоутримуючих і антикорозійних властивостей функціональних поверхонь і т.п.) значною мірою обумовлюється не тільки призначеними конструктором нормами точності та якості окремих поверхонь виробу, але й такими важливими чинниками, як мікротопологія поверхонь, залишкові напруження і деформації поверхневого шару тощо. Але ж *формування цих характеристик виробу залежить від структури та параметрів технологічного процесу його виготовлення і не може бути апіорно пронормоване конструктором.* Тому без реалізації рекурентних зв'язків технологічного етапу підготовки виробництва з попередніми етапами конструкторського та інженерного аналізу неможливо врахувати вплив напружено-деформованого стану деталі на формування кваліметричних показників роботи виробу в цілому. Системний принцип реалізації життєвого циклу продукції вимагає безпосереднього зв'язку технологічного етапу з експлуатаційним етапом, а не лише їх опосередкованого зв'язку через забезпечення умов та обмежень, сформульованих на конструкторському етапі. Крім того, досягнуті відповідною технологією мікрогеометричні та залишкові напружено-деформаційні параметри повинні бути проаналізовані у системі інженерного аналізу (CAE-система) щодо вагомості їх впливу на функціональні показники виробу. Цим забезпечується принцип паралельного інжинірингу у модернізованій PLM-системі (Product Life Management). Тому копіювання класичного алгоритму прийняття технологічних рішень для такої системи суттєво обмежує потенціал інтегрованої автоматизованої конструкторсько-технологічної системи підготовки машинобудівного виробництва.

Таким чином, для комплексного забезпечення життєвого циклу машинобудівної продукції (PLM-системи) є **актуальним** створення та впровадження наукових та прикладних засад функціонально-орієнтованих технологій (ФОТ). Головною особливістю ФОТ є те, що первинним у формуванні структури та параметрів технологічних операцій і переходів є забезпечення засобами паралельного інжинірингу комплексу функціонально-експлуатаційних

властивостей виробу при дотриманні заданих параметрів точності, нормативного ресурсу його роботи а також організаційних та техніко-економічних обмежень. У цьому випадку функцією мети при прийнятті рішень про оптимальну структуру та параметри технологічного процесу є інтегральний кваліметричний показник, який системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо найбільш навантажених поверхонь виробу і отримується як результат формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій. При реалізації функціонально-орієнтованої технологічної підготовки виробництва система не підміняє результати роботи конструктора, а лише доповнює їх такими важливими критеріями, як мікротопологія поверхневого шару, залишкові напруження та деформації тощо. Наповнення репозиторія даних (PDM) відбувається вже на стадії технологічної підготовки виробництва шляхом вдосконалення цифрового макету виробу, а не в результаті проведення трудомістких експериментальних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі технології машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» в рамках держбюджетної роботи МОН України: «Проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу» (№ держреєстрації 0113U006297), де автор був керівником проекту; та робіт за міжнародною НДКР «Вимірювання та моделювання залишкових напружень у зразках сплавів» (договір № NA/16/2015/0500) за замовленням Жешувського технологічного університету (Республіка Польща), де автор був відповідальним виконавцем.

Мета і задачі досліджень. *Метою дисертаційної роботи є підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин шляхом формування комплексу оптимальних параметрів якості поверхонь на засадах функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення виробів, проектування яких здійснюється засобами паралельного інжинірингу..*

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі задачі:

– Провести аналіз сучасного стану технологічного забезпечення інтегрованих систем автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва та розробки методів прогнозуючого моделювання процесів механічного оброблення виробів.

– Розробити методичне та алгоритмічне забезпечення автоматизованої технологічної підсистеми формоутворення деталей, в основі якої лежить проблемно-орієнтований аналіз імітаційної реологічної моделі окремих технологічних переходів та комплекс аналітично-прикладних програм формування параметрів точності, деформаційних, термодинамічних, мікрогеометричних, структурних та фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

– Створити методики імітаційного моделювання мікрогеометричних та залишкових напружено-деформаційних параметрів механічного оброблення деталей з наступним аналізом їх впливу на функціональні властивості окремих поверхонь та виробу в цілому в умовах його потенційної експлуатації.

– Засобами математичного моделювання забезпечити формалізацію зв'язків між структурою технологічного процесу і його параметрами та домінуючими експлуатаційними властивостями деталей.

– Розробити методику структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу та алгоритм розрахунку інтегрального кваліметричного показника, який системно характеризує функціональні властивості навантажених поверхонь виробу.

– Провести експериментальну апробацію та навести узагальнюючий приклад реалізації запропонованої теорії функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів механічного оброблення виробів машинобудування.

Об'єкт дослідження – функціонально-орієнтований технологічний процес механічного оброблення виробів машинобудування.

Предмет дослідження – процеси формування мікро- і макрогеометричних параметрів та характеристик напружено-деформаційного стану поверхонь деталі,

що утворюються при механічному обробленні та їх зв'язок з основними експлуатаційними показниками машинобудівних виробів.

Методи досліджень. При виконанні дисертаційної роботи застосовувалися сучасні методи модельних та натурних досліджень. Для імітаційного моделювання напружено-деформованого стану заготовки в зоні формоутворення поверхонь деталі використано метод скінченних елементів. Аналіз формування параметрів деформаційних, термодинамічних, мікрогеометричних, структурних та фазових параметрів оброблюваних поверхонь виконувався на основі результатів імітаційного реологічного моделювання. Планування модельних та натурних експериментів і опрацювання їх результатів виконані на основі теорії багатофакторного аналізу. Для визначення найбільш ефективного варіанту технологічного процесу за функціонально-орієнтованим принципом його формування використовувались теоретичні основи багатокритеріальної структурно-параметричної оптимізації. Формулювання евристичних процедур при вирішенні задач оптимізації здійснювалось на основі положень математичної логіки. Експериментальні роботи дослідження залишкових напружень та деформацій оброблених поверхонь виробів проводились на основі методу акустичної тензометрії, що базується на зміні швидкості поширення релеївських поверхневих ультразвукових хвиль. У методиках опрацювання результатів досліджень застосовано числові методи розв'язання систем диференціальних рівнянь та числового інтегрування.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблені та змістовно обґрунтовані наукові засади проектування функціонально-орієнтованих технологічних процесів, що дало змогу створити концепцію системного забезпечення комплексу експлуатаційних показників машинобудівних виробів на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

2. Вперше створено методичне та алгоритмічне забезпечення автоматизованої підсистеми формоутворення виробів (*Computer Aided Forming*

System (CAF)) в складі автоматизованої інтегрованої системи підготовки машинобудівного виробництва.

3. Розроблено наукові основи імітаційного моделювання технологічних операцій і переходів в поєднанні з комплексом функціональних модулів та аналітично-прикладних програм формування точнісних, напружено-деформаційних, мікрогеометричних та структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

4. Вперше поставлено та розв'язано проблему багатокритеріальної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу на основі розрахунку інтегрального кваліметричного показника, який системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо найбільш навантажених поверхонь виробу і отримується як результат формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена методологія функціонально-орієнтованого технологічного проектування та комплекс підпрограм, що дасть змогу системно забезпечити ефективність функціонування виробу протягом всього його життєвого циклу. Впровадження цієї методології не потребує значних витрат і може бути оперативно впроваджено як на підприємствах машинобудівної галузі, так і в науково-дослідних підрозділах, що займаються проблемами розробки та впровадження автоматизованих систем підготовки машинобудівного виробництва. Розроблені в дисертаційній роботі методики дозволили провести системний аналіз впливу структури та параметрів технологічного процесу на формування залишкових напружень та деформацій поверхонь після механічного оброблення деталей авіаційної техніки та параболічних антен з титано-нікелевих та алюмінієвих сплавів для ДП «Закарпатське вертолітне виробниче об'єднання» Державного концерну «Укроборонпром». Крім того, результати досліджень впроваджені на ТЗОВ «ІнтерПЕТ» (м.Львів) для підвищення якості та продуктивності оброблення деталей пресформ та штампів та на ТДВ «ЛЬВІВАГРОПРОЕКТ» для підвищення

ефективності технологічних процесів механічного оброблення деталей машин та механізмів сільськогосподарського призначення. Результати дисертаційної роботи використовуються у лекційних курсах кафедри технології машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» та при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт по спеціальності 8.050502.01.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом тривалих досліджень автором проблем розвитку інтегрованих систем конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва, впровадження PLM та CALS-технологій а також методів прогнозуючого імітаційного моделювання процесів формоутворення. Усі основні результати досліджень, наведені в дисертації (постановка задач, формулювання концепції функціонально-орієнтованого технологічного проектування, передумов структурного та програмного синтезу автоматизованої системи формоутворення (CAF-системи), методик, алгоритмів та програм багатокритерійної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесів тощо) отримані здобувачем особисто і опубліковані в 60 наукових статтях та тезах доповідей конференцій та симпозіумів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: 17-й міжнародній конференції «International Conference on Production Research. ICPR-17» (Блекбург, Вірджінія, США, 2003); V (2003 р.), IX (2009 р.), XI (2013 р.) Міжнародних симпозіумах українських інженерів-механіків (Львів); 67 Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2007 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інструменти та інструментальне виробництво» (Львів, 2007 р.); 9-й (2009 р.), 10-й (2010 р.), 11 (2011 р.) Міжнародних промислових конференціях "Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах» (Славське); XX Українсько-Польській Міжнародній конференції «CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues» (Львів, 2012 р.); 3-й міжнародній науково-технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування,

виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів 2012 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, 2012 р.); Міжнародній науковій конференції «Пошук концептуальних засад розвитку сучасної науки» (Київ, 2012 р.); I (2012 р.), II (2014 р.) та III (2015 р.) Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Прогресивні технології у машинобудуванні» (Львів); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод» (Краматорськ, 2012 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Системи автоматизованого проектування та комп'ютерного моделювання в технології машинобудування» (Львів, 2013 р.); IX Міжнародній конференції “Strategy of quality in industry and education” (Варна, Болгарія, 2013 р.); 13 Міжнародній Промисловій конференції «Материалы. Методы. Технологии» (Плав'я, 2013 р.); IV Міжнародній науково – практичній конференції «Теоретичні та експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства і машинобудування» (Луцьк, 2013 р.); XX міжнародній науково-технічній конференції «Машинобудування і техносфера XXI століття», (Севастополь, 2013 р.); XXII (2014) та XXIII (2015) Міжнародних науково-технічних семінарах «Високі технології в машинобудуванні. Інтерпартнер-2014 (2015)» (Одеса).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 59 публікаціях, з яких 6 - у закордонних періодичних фахових виданнях, 4 - у вітчизняних виданнях, внесених до міжнародних наукометричних баз, 27 публікацій у наукових фахових виданнях України, 22 публікацій тез конференцій та симпозіумів.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 312 стор. (13 авт. арк.) і складається зі вступу, 6 розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 534 сторінки; з них 132 рисунка по тексту (62 рисунки на окремих сторінках), 14 таблиць по тексту (11 таблиць на окремих сторінках), 8 додатків на 110 сторінках, список використаних джерел з 327 найменувань на 33 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПІДГОТОВКИ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА РОЗРОБКИ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУЮЧОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ВИРОБІВ

1.1. Особливості існуючих інтегрованих CAD/CAE/CAPP/CAM систем та тенденції розвитку PLM технологій в машинобудуванні

Інтенсивний розвиток високотехнологічного ринку машинобудівної продукції є можливим тільки завдяки застосуванню сучасних науковомістких технологій підготовки та управління виробництвом. На сьогоднішній день інструменти їх реалізації, в основному, зосереджені в галузі інформаційних технологій. Протягом останніх десятиліть для скорочення термінів проектування та забезпечення високої якості випуску продукції все ширше застосовуються інтегровані або локальні системи автоматизованого проектування: системи конструкторського проектування (CAD) (SolidWorks, AutoCAD, NX (Unigraphics), ProEngineer та ін.); системи технологічного проектування (CAPP), що забезпечують можливість багатоваріантного проектування технологічних процесів в автоматичному або інтерактивному режимі, системи автоматизованого програмування для верстатів з ЧПК (CAM) та автоматизовані системи інженерних розрахунків (CAE). Інтегрування окремих підсистем в єдину систему автоматизованого проектування дозволяє здійснювати конструкторське і технологічне проектування в єдиному циклі, скоротити терміни підготовки виробництва, підвищити ефективність проектних робіт і якість виготовлення виробів машинобудування [1, 5, 13, 62, 130, 148, 228, 269].

Схема інформаційних потоків між окремими підсистемами при реалізації автоматизованого конструкторсько-технологічного та виробничого циклу виготовлення машинобудівної продукції наведена на рис.1.1. [60, 62, 65, 280].

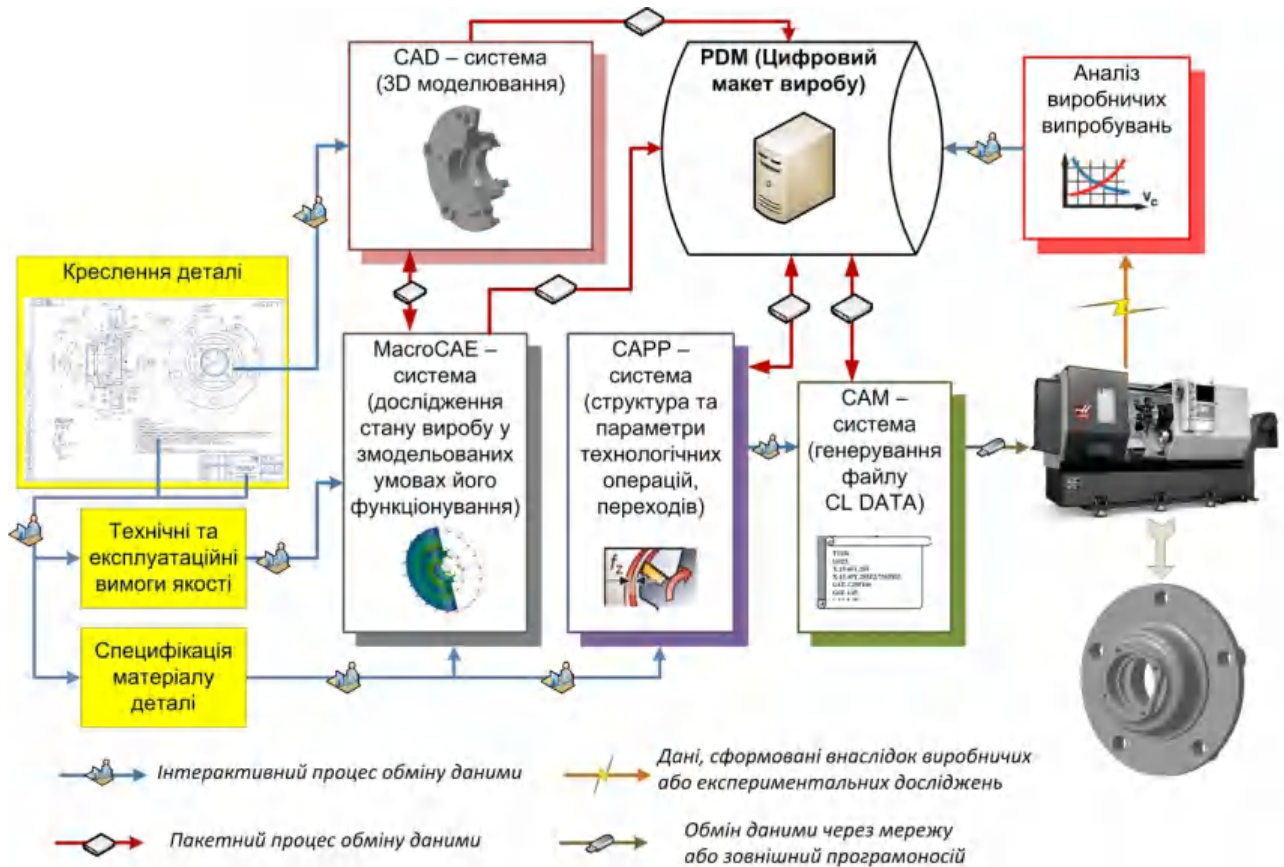


Рис.1.1. Структурна схема існуючої інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва

Проте, аналіз використання більшості сучасних систем конструкторсько-технологічної підготовки виробництва [62, 65, 130, 148, 228] показав, що дуже дорогі автоматизовані інформаційні системи машинобудівного виробництва (AIC) вирішують проблеми лише частково. Це обумовлено тим, що традиційні CAD, CAM, CAE, PDM, FRP, MRP, MRPII, MES системи (Computer Aided Design, Computer Aided Manufacturing, Computer Aided Engineering, Product Data Management, Finance Requirements Planning, Material Requirements Planning, Manufacturing Resource Planning, Management Execution System), в основному, орієнтовані на локальну автоматизацію і формування замкнених проблемно-орієнтованих баз даних (БД). Такий підхід не вирішує проблем створення єдиного інформаційного простору, призначеного для синхронізованого обміну даними в частині конструкторсько-технологічного проектування. Так, згідно із статистичними даними, зібраними аналітичною компанією Standish Group

(США), з 30 тис. проектів АІС, обстежених в США в період з 1994 по 2009 рік, фінансово успішними виявилися не більше 24% проектів [59]. Проведений аналіз показав, що більшість проблем пов'язана саме з відсутністю або неправильним застосуванням методології створення АІС, що не відповідає вимогам підприємств, оскільки не забезпечує вирішення інтегрованих завдань технічної підготовки і оперативного управління виробництвом машинобудівного підприємства, обмежуючись лише їх стратегічним плануванням. В той же час, окремі CAD/CAM/CAE підсистеми не мають прямих інформаційних взаємозв'язків. Усе це спричинює наявність значного функціонального і інформаційного розриву між цими компонентами АІС [180]. Підтвердженням цієї тенденції є той факт, що починаючи з 2008 року до розробки АІС класу PLM повністю перейшли такі лідери ІТ-галузі, як SAP та Oracle Corporation, відмовившись від підтримки проектів локалізованого інформаційного забезпечення CAD-систем [180].

Починаючи з початку ХХІ століття, для всіх найбільш ефективних машинобудівних САПР середнього і верхнього рівня (Pro/Engineer (Parametric Technology Corporation), CATIA (Dassault Systèmes), SolidWorks (SolidWorks Corp.); Nastran (MCS Inc.), NX (Siemens PLM Software)) є характерною системою інтеграція програмних продуктів (оптимально - створення гібридних CAD/CAE/CAPP/CAM програмних продуктів) з метою більш ефективного обміну конструкторсько-технологічною інформацією в єдиних уніфікованих форматах та прототипах репозиторія даних (MIL-STD-2549 Configuration Management Data Interface [2]).

Для реалізації комп'ютерної технології проектування і виробництва застосовуються системи автоматизованого проектування інженерного аналізу і комплексної технологічної підготовки виробництва (CAD/CAE/CAPP/CAM), а також системи управління проектом (PDM — *Product Data Management*). Ці системи, по-перше, забезпечують весь цикл створення виробу від концептуальної ідеї до її реалізації, а по-друге, створюють проектно-технологічне середовище для одночасної роботи всіх учасників створення машинобудівної продукції з єдиною віртуальною електронною моделлю цього

виробу. На Заході ця організаційна система позначається аббревіатурою CAPE (*Concurrent Art-to-Product Environment*) - система підтримки паралельного проектування (або паралельний інжиніринг) [84]. Керуючись такою концепцією, можна різко скоротити цикл створення виробу, підвищити технічний рівень проектів, уникнути нестиковок і помилок у виготовленні оснащення та самого виробу завдяки тому, що всі дані взаємопов'язані і контрольовані. Перший офіційний рамковий стандарт, що з'явився в цій області, називався ISO/IEC 12207:1995 *Information Technology - Software Life Cycle Processes*, тоді як нова редакція, що з'явилася лише через 13 років, має назву ISO/IEC 12207:2008 *Systems And Software Engineering - Software Life Cycle Processes* [14]. Крім того, в останні роки з'явилися стандарти, в яких визначаються деталізовані вимоги до окремих процесів життєвого циклу виробів машинобудування, такі як ISO/IEC 16085 : 2006 *Systems and Software Engineering - Life Cycle Processes - Risk Management*, ISO/IEC 15939:2007 *Systems and Software Engineering - Measurement Process*, ISO/IEC 26702:2007 *Systems Engineering - Application and Management of the Systems Engineering Process* та інші [14, 15, 16, 17].

За останні роки CAD-системи, як системи геометричного моделювання, значно удосконалювалися: з'явилися не тільки засоби тривимірного (3D) твердотілого моделювання, але й поверхневого та гібридного моделювання (наприклад, програмний продукт PowerShape компанії Delcam Plc. (Великобританія)), системи параметричного конструювання тощо. Незважаючи на усі удосконалення, що стосуються в основному геометричних функцій, CAD-системи не у повній мірі допомагають конструктору з точки зору усього процесу конструювання. Вони забезпечують лише опис геометричних форм виробів і автоматизують рутинні операції (формування розмірних ланцюгів, генерацію специфікацій і т.п.). Такі системи, в основному, базуються на методології традиційної неавтоматизованої конструкторської роботи. Конструктори, як і раніше, застосовують геометричні елементи низького рівня (точки, прямі, дуги, поверхні і т.п.) при описі своїх виробів. Лише починаючи з 2010 року деякі CAD-системи почали підтримку конструювання за допомогою

конструкторсько-технологічних елементів (features) (Solid Works 2012-2015, AutoCAD 2011-2015, ProEngineer v.5, NX v.9), які можна віднести до макрогеометричних елементів вищого порядку.

Ще у 90-х роках значний розвиток також отримали системи автоматизації проектування технологічних процесів (CAPP) і програмування виготовлення деталей на верстатах з числовим програмним управлінням (ЧПК) (CAM) [227, 228, 229]. Проте, удосконалення цих систем, так само як і удосконалення CAD-систем, торкалося, в основному, внутрішніх проблем, розширення власних баз даних, СУБД тощо. CAPP-системи можуть генерувати технологічні процеси автоматично, але тільки за умови спеціального опису виробу за допомогою асоціативних конструкторсько-технологічних елементів. Це ж торкається і САМ-систем. Прикладом реалізації таких підсистем може служити відомий в країнах бувшого СРСР програмний продукт компанії АСКОН – САПР ТП «Вертикаль» [112]. Але у цьому випадку обов'язково повинна використовуватися геометрична база даних корпоративної CAD-системи (у випадку з «Вертикаллю» – база програмного продукту Компас 3D). Причому, користувач повинен вручну ввести усі дані для роботи CAPP-системи [130].

Таке положення не задовольняє сучасним вимогам, оскільки вони вимагають реалізацію комплексної комп'ютеризації інженерної діяльності на усіх етапах життєвого циклу виробів, яка дістала назву «CALS-технології». Традиційні САПР з їх геометричним ядром не можуть стати основою для створення CALS-технологій [84, 224, 269]. Уперше концепція CALS-технологій (*Continuous Acquisition and Life Cycle Support* — безперервна інформаційна підтримка життєвого циклу продукції) була сформульована для військових потреб США ще у 80-ті роки минулого століття [84], але зараз вона поширилася на інші галузі економіки. В теперішній час на ринку ІТ-продукції є досить багато машинобудівних програмних продуктів, що реалізують принципи CALS, але далеко не завжди запропоновані рішення повною мірою закривають усі етапи життєвого циклу виробу зважаючи на його складність. Створення автоматизованих систем управління для кожного з етапів — дорогий і тривалий захід. CALS - це концепція, що об'єднує принципи і технології інформаційної

підтримки життєвого циклу продукції на усіх його стадіях, заснована на використанні інтегрованого інформаційного середовища (єдиного інформаційного простору), як така, що забезпечує моноформатні засоби керування процесами і взаємодії усіх учасників цього циклу: замовників продукції, постачальників сировини, безпосередніх виробників продукції, експлуатаційного і ремонтного персоналу тощо [84]. Така методологія забезпечення ЖЦ машинобудівної продукції реалізована відповідно до вимог системи міжнародних стандартів, що регламентують правила вказаної взаємодії переважно за допомогою електронного обміну даними. В теперішній час у світі діють більше 25 національних організацій, що координують питання розвитку CALS-технологій, у тому числі в США, Канаді, Японії, Великобританії, Німеччині, Швеції, Норвегії, Австралії, а також в НАТО [84].

Американські фахівці на 45-му економічному форумі у Давосі представили сенсаційну кількісно-відсоткову оцінку ефективності CALS-технологій при умові їх повного впровадження у виробництво США. За цими підрахунками виходить, що видатки на проектування наукоємного продукту скорочуються від 10 до 30%; час, що є необхідним для комерціалізації продукту, зменшується на 40 - 60%; скорочення видатків на підготовку технічної документації - до 40%; розробку експлуатаційної документації можна скоротити до 30% [53]. У зв'язку з очікуваною економією коштів і додаткових прибутків у сфері CALS-технологій залучаються значні інвестиції. Наприклад, у США вони складають близько 1 млрд.\$ на рік. Уряд Фінляндії витрачає на національну програму у цій галузі близько 20 млн.\$, Німеччина - 40 млн.\$, Англія - 55 млн.\$ [244]. Причому, питома вага інвестицій у сфері CALS – технологій складається не тільки з коштів державного бюджету окремої країни. Великі корпорації інвестують чималі кошти на розвиток зазначеної сфери, адже визнають ефективність таких капіталовкладень. Так, наприклад, General Motors тільки протягом 2000-2005 року витратила на розвиток корпоративних CALS-технологій приблизно 3 млрд.\$. Причому, середня величина видатків на один проект, який присвячено вирішенню локального завдання в сфері CALS–

технологій (наприклад, розробка стандарту чи програми), складають 1,2-1,5 млн.\$. Середній строк виконання проекту складає два - чотири роки [244].

Подальший розвиток концепцій CALS зумовлений появою нової організаційної форми виконання масштабних проектів, пов'язаних з розробкою, виробництвом і експлуатацією складної продукції – т.зв. "віртуального підприємства" (ВП) - форми об'єднання на контрактній основі підприємств і організацій, що беруть участь в підтримці життєво циклу виробу [84].

Виробничі компанії прагнуть скоротити терміни розробки інноваційних виробів, одночасно зберігаючи високі стандарти якості. Але використання потужних 3D CAD технологій не завжди дозволяє підприємствам поліпшити процеси виготовлення нової продукції і отримати очікуваний прибуток у вигляді зниження витрат і зменшення термінів розробки виробів. Перетворення процесу розробки виробу розпочинається з моделювання, який визначає увесь життєвий цикл виробу - від аналізу до розробки інструментів, виробничого і складального процесів, обслуговування і підтримки. На сьогоднішній день глобальні світові виробники машинобудівної продукції (General Motors, Siemens Ltd, Mitsubishi Corp, Bosh, Toyota Ltd та інш.) продають не стільки сам продукт, скільки весь життєвий цикл виробу. Існує навіть спеціальний термін «вартість володіння» — це витрати не лише на купівлю продукту, але і на його експлуатацію, а в деяких випадках — і на утилізацію [158].

Очевидно, що більш поширеним є поняття PLM (Product Life Management). CALS-технологія використовується лише як інформаційна база PLM [14, 15, 16, 61, 62, 65, 180]. Технології PLM об'єднують методики і засоби інформаційної підтримки виробів впродовж усіх етапів життєвого циклу виробів (рис.1.2). Характерна особливість PLM — забезпечення взаємодії як засобів автоматизації різних виробників, так і різних автоматизованих систем багатьох підприємств, тобто технології PLM (включаючи технології CPC) є основою, що об'єднує інформаційний простір, в якому функціонують САПР, ERP, PDM, SCM, CRM і інші автоматизовані системи багатьох підприємств. В основу PLM-технологій покладений ряд стандартів і, передусім, це стандарти STEP, а також Parts Library, Mandate, SGML (Standard Generalized Markup

Language), EDIFACT (Electronic Data Interchange For Administration, Commerce, Transport) та ін. Стандарт SGML встановлює способи уніфікованого оформлення документів певного призначення — звітів, каталогів, бюлетенів і т. п., а стандарт EDIFACT — способи обміну подібними документами [14, 18].

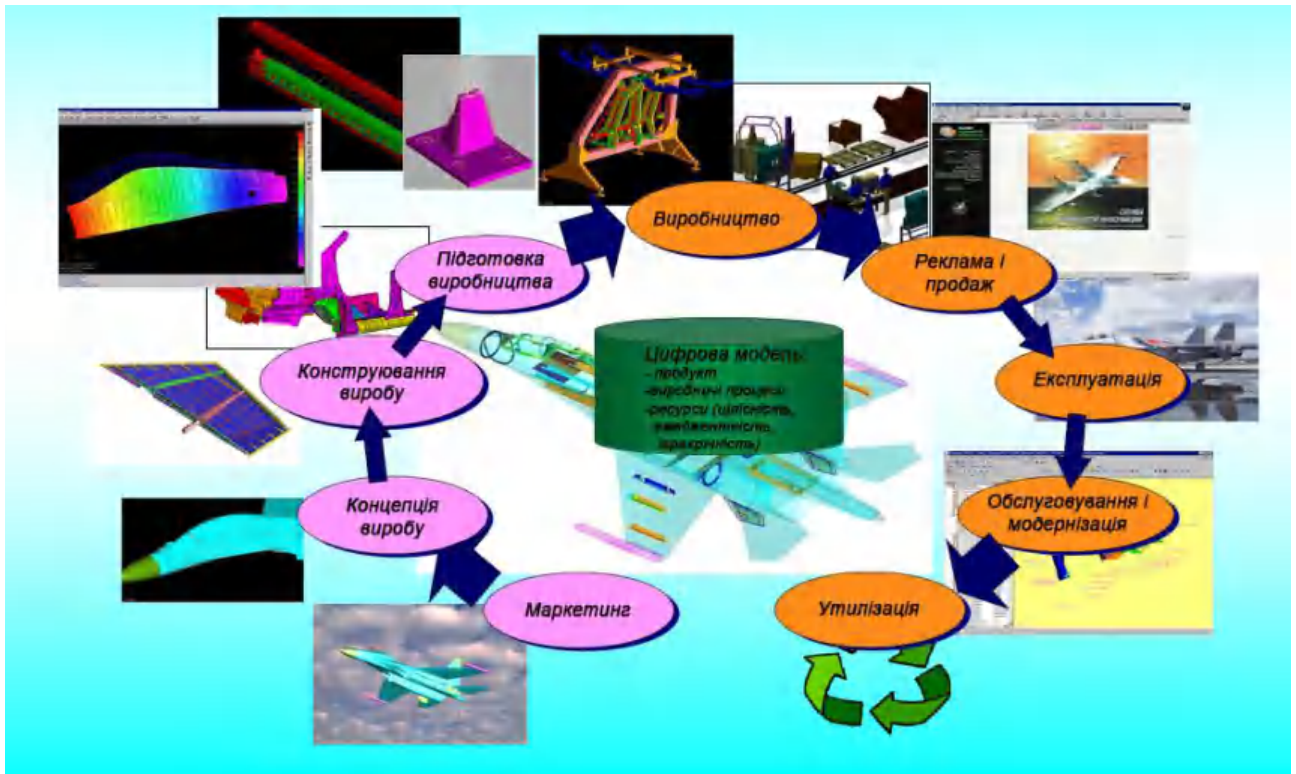


Рис.1.2. Узагальнена структурна схема функціонування PLM-системи

Основним джерелом інформації при прийнятті технологічних рішень щодо ефективності забезпечення експлуатаційних властивостей об'єкту машинобудівного виробництва є системна інженерія поверхонь, що включає в себе результати досліджень по формуванню мікро- та макротопології поверхневого шару поверхонь виробів, їх залишкового напружено-деформованого та структурно-фазового стану тощо [293, 294, 295]. Найважливішим компонентом методологічного базису системної інженерії є міжнародні стандарти. Стандарти і нормативні керівництва з системної інженерії розробляються, в основному, трьома організаціями: Об'єднаним технічним комітетом ISO та IEC, де розглянутими питаннями зайнятий в першу чергу 7-й підкомітет «Програмна і системна інженерія», Інститутом інженерів

електротехніки та електроніки (IEEE) і Міжнародною радою з системної інженерії (International Council on Systems Engineering - INCOSE). Ці три організації проводять роботу по стандартизації в області системної і програмної інженерії за узгодженими програмами. Крім того, істотний внесок у розробку нормативно-технічної бази системної інженерії внесли Альянс електронної індустрії (Electronic Industries Alliance - EIA) [2], та Інститут програмної інженерії університету Карнегі-Меллон [7, 8].

Сьогодні стандарти системної і програмної інженерії розробляються, як правило, у нерозривній єдності і являють розвинену систему, в якій представлені база знань та досліджень, гармонізовані між собою основні стандарти на процеси життєвого циклу систем і програмних засобів, стандарти оцінки якості процесів ЖЦ систем та управління ІТ сервісами. Крім того, в останні роки з'явилися стандарти, в яких визначаються деталізовані вимоги до окремих процесів ЖЦ систем, такі як ISO/IEC 16085: 2006 Systems and software engineering - Life cycle processes - Risk management, ISO/IEC 15939: 2007 Systems and software engineering - Measurement process, ISO/IEC 26702: 2007 Systems engineering - Application and management of the systems engineering process та інші [14, 15, 16, 17, 18]. Таким чином, у світі швидкими темпами йде робота з формування розвиненої системи нормативно-технічної документації, що містить опис методологічного базису створення систем різних класів і призначень на основі єдиного системного підходу впровадження PLM-технологій у виробництво.

Один з лідерів впровадження PLM-систем у машинобудуванні є компанія Siemens PLM Software з програмним продуктом NX 9.0 PLM (попередня назва продукту – Unigraphics). Ця система пропонує інструменти і технології нового покоління. Розроблена компанією Siemens PLM Software т.зв. синхронна (паралельна) технологія моделювання [115] вперше була реалізована у версії NX 6, випуск якої відбувся ще у 2008 році. Дана технологія дозволяє застосовувати два основних підходи до моделювання: параметричне проектування і пряме редагування. Завдяки використанню цієї технології розширені можливості функції «Design Freedom», яка визначає функції

конструктивних елементів, не вимагаючи опису елементів та їх обмежень вручну. Функціонування паралельної технології можливо завдяки використанню варіаційного підходу до проектування виробу, що складається у зв'язуванні граничних елементів геометричної моделі логічними і параметричними обмеженнями (як заданими користувачем, так і автоматично розпізнаними САД-системою). Нові методи вибору об'єктів автоматично розпізнають логічні і внутрішньоелементні зв'язки навіть на моделях, імпортованих з інших САПР, що сприяє багаторазовому використанню проектних даних [134]. Якісно нові інструменти дозволяють розробляти вироби в єдиному керованому середовищі шляхом інтеграції усіх процесів. Завдяки об'єднанню параметричного моделювання і моделювання без дерева побудови, а також технології активного макету, що полегшує роботу з складальними процесами, NX встановлює нові стандарти швидкості, продуктивності і легкості застосування систем підготовки виробництва[115, 148].

Ще одним світовим лідером у розробці та впровадженні PLM-систем є компанія Dassault Systèmes з відомою системою конструкторсько-технологічної підготовки виробництва CATIA (Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application) [87, 148]. У 2008 р вийшла версія CATIA V6, заснована на технології PLM 2.0. PLM 2.0 - загальна назва другого покоління засобів управління життєвим циклом виробів, запропоноване компанією Dassault Systemes для маркетингу своїх PLM-продуктів (CATIA, ENOVIA, NATTA, SIMULIA, 3DVIA). САПР ТП «NATTA» є підсистемою інтегрованої системи технічної підготовки і управління виробництвом, в яку, поряд з NATTA, входить конструкторська САД-система, побудована на базі CATIA, а також PDM-система ENOVIA і ERP система SAP (рис.1.3). Головною відмінною особливістю системи NATTA і її перевагою є модульне проектування, що базується на асоційованих конструктивних і технологічних модулях, і синтез техпроцесів з технологічних модулів. Це обумовлює універсальність методології автоматизації технологічного проектування NATTA і високу гнучкість системи. Ні в одній іншій технологічній САПР ця методологія не реалізована. NATTA забезпечує вирішення основних технологічних завдань -

побудова структури техпроцесу, проектування заготовок і операційних ескізів, вибір засобів технологічного оснащення, призначення технологічних операцій і переходів, визначення режимів обробки, матеріальне та трудове нормування, проектування засобів технологічного оснащення і керуючих програм для верстатів з ЧПК.

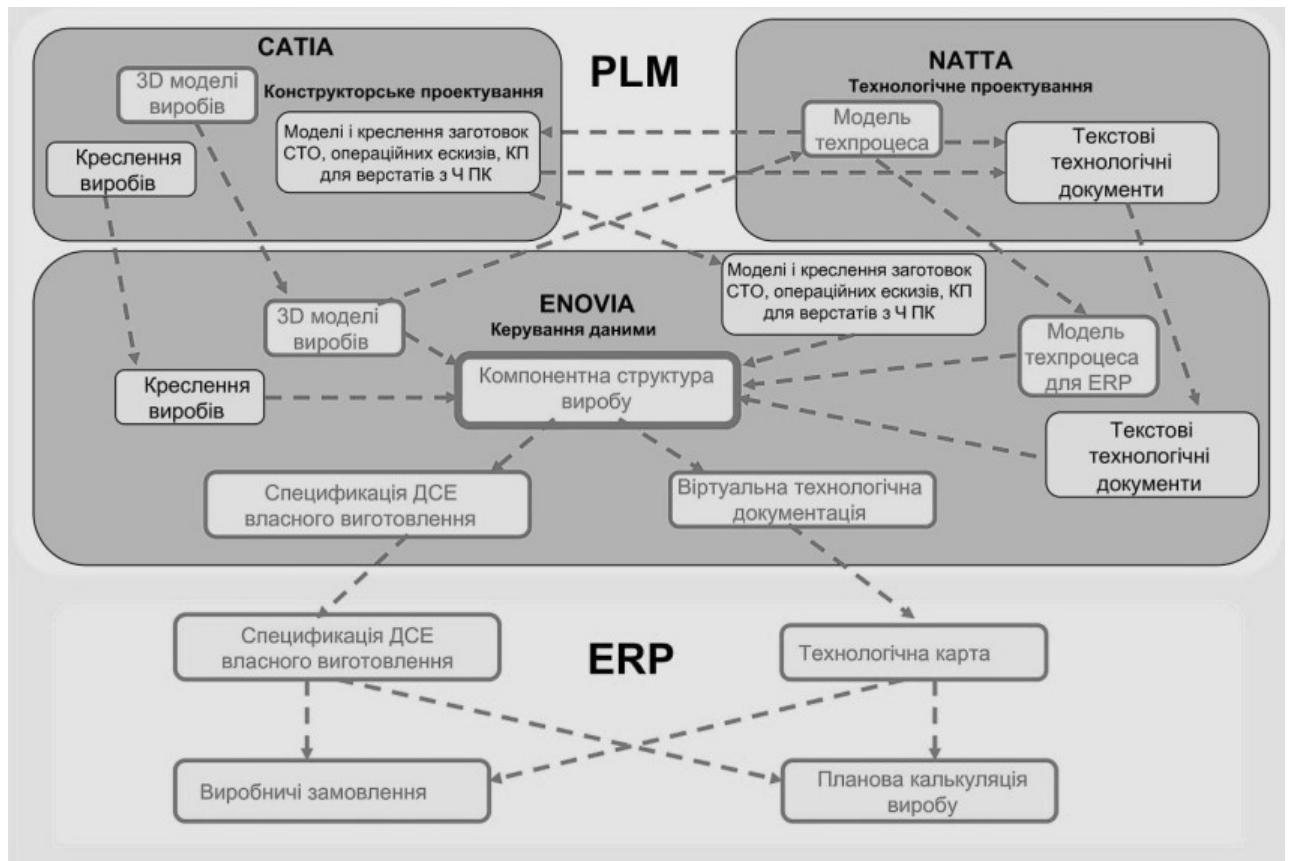


Рис.1.3. Схема інформаційних потоків в PLM 2.0 компанії Dassault Systèmes

Відмінною особливістю NATTA є високий ступінь автоматизації проектування. Базовим режимом проектування NATTA є автоматизований діалог. Проектант (якщо вважає за необхідне) керує процесом проектування, а технологічні завдання NATTA вирішує автоматично. Цей режим виглядає наступним чином. На вхід NATTA надходить модель виробу, в тому вигляді, як її створив конструктор. Оператор дає вказівки, наприклад, заготовка - поковка, річна програма - 10000 шт., токарну обробку виконати на ЧПК. Проектування техпроцесу виконується інтерактивно з урахуванням побажань технолога. Ноу-хау NATTA є високий ступінь інтеграції з CATIA. Обмін інформацією між системами здійснюється в обидві сторони в автоматичному режимі. З CATIA до

NATTA передається інформація про виріб, необхідна для технологічного проектування. З NATTA в CATIA передається інформація про спроектовані в NATTA заготовки, операційні ескізи, СТО, програми ЧПК, для побудови моделей цих об'єктів і формування відповідних документів. Такий ступінь інтеграції з CAD системами немає в жодній іншій САПР ТП.

Портфоліо ENOVIA включає три лінії продуктів: ENOVIA VPLM для колективного віртуального управління життєвим циклом складних виробів, ресурсами та виробничими процесами в середніх і великих компаніях, ENOVIA MatrixOne - систему управління бізнес-процесами спільної розробки виробів для підприємств різних галузей промисловості і ENOVIA SmarTeam - систему спільного управління даними про продукцію для невеликих і середніх компаній, конструкторських відділів великих підприємств. Повна інтеграція з системами CATIA і NATTA забезпечує створення компонентної структури виробу для подальшого стратегічного планування ресурсами підприємства.

Інтегрована система планування ресурсів підприємства ERP (Enterprise Resource Planning) - організаційна стратегія інтеграції виробництва і операцій, управління трудовими ресурсами, фінансового менеджменту та управління активами, орієнтована на безперервну балансуювання та оптимізацію ресурсів підприємства за допомогою спеціалізованого інтегрованого пакету прикладного програмного забезпечення, що забезпечує загальну модель даних і процесів створених на рівні підсистем конструкторського та технологічного проектування.

Відомою в Україні реалізацією ідеології і принципів концепції PLM технологій стала «Наскрізна 3D технологія АСКОН», що у значній мірі відповідає методології повної корпоративної інтеграції і взаємодії усіх компонентів автоматизованої конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва [158]. «Наскрізна 3D технологія» — це сукупність програмного забезпечення і методик його застосування для створення на підприємстві єдиного інформаційного простору по управлінню життєвим циклом виробу в цифровому форматі з урахуванням вітчизняних

ГОСТів в області управління підприємством і управління інформацією про виріб.

Підвищити ефективність виробничої продукції, тим самим понизивши собівартість виробу, в справжніх умовах можливо тільки за рахунок наскрізного управління життєвим циклом виробу повністю в електронному вигляді від розробки до утилізації. Для цього необхідно вдосконалити (в т.ч. через аутсорсінг) наскрізне управління виробництвом за схемою «конструкторська підготовка - технологічна підготовка - виробництво – сервіс - утилізація» і відповідати наступним вимогам, які диктує специфіка машинобудівної галузі [1, 5, 13, 62, 148, 228]:

- забезпечити умови паралельного інжинірингу (сумісної роботи над єдиним замовленням в інформаційному середовищі, алгоритмічна підтримка рекурентних та ітераційних зв'язків конструкторського та технологічного етапу підготовки виробництва);

- забезпечити відповідність документації на виріб не лише вітчизняним (ЄСКД, ЄСТД), але й міжнародним стандартам ISO;

- забезпечити вимоги комплексної оптимізації при прийнятті технологічних рішень, виходячи з умов майбутньої експлуатації, ремонту та утилізації об'єктів машинобудівного виробництва.

Усі ці чинники накладають певні зобов'язання на машинобудівні підприємства і на організацію їх роботи. Гостра конкурентна боротьба на ринку праці примушує знижувати вартість самого виробу і його експлуатації, покращувати характеристики ремонтпридатності техніки, підвищувати якість взаємодії із замовником і забезпечувати скорочення термінів розробки і виведення виробів на ринок, тобто виникає необхідність скорочувати час конструкторської і технологічної підготовки виробництва.

Принцип паралельного інжинірингу припускає виконання процесів розробки і проектування одночасно з моделюванням процесів виготовлення і експлуатації [63, 68]. Сюди ж відноситься одночасне проектування різних компонентів складного виробу. При паралельному інжинірингу багато проблем, які можуть виникнути на пізніших стадіях життєвого циклу виробу,

виявляються і вирішуються на стадії проектування. Такий підхід дозволяє підвищити якість виробу, скоротити час його виводу на ринок, скоротити витрати. Відмінностями паралельного інжинірингу (ПІ) від традиційного підходу до організації процесів інженерної діяльності є: ліквідація традиційних бар'єрів між функціями окремих фахівців шляхом створення, а при необхідності - подальшого перетворення, багатoproфільних робочих груп; ітеративність та рекурентність процесу наближення до необхідного результату [203, 204].

Концепція PLM припускає послідовну, безперервну зміну і вдосконалення бізнес-процесів розробки, проектування, виробництва і експлуатації виробу. Вже сьогодні багато іноземних замовників вітчизняної продукції висувають вимоги, задоволення яких неможливе без впровадження PLM-технологій [63]:

- представлення конструкторської і технологічної документації в електронній формі;
- представлення експлуатаційної і ремонтної документації у формі інтерактивного електронного технічного керівництва, забезпеченого ілюстрованими електронними каталогами запасних частин і допоміжних матеріалів і засобами дистанційного замовлення запчастин і матеріалів;
- організація інтегрованої логістичної підтримки виробів на поствиробничих стадіях їх життєвого циклу;
- наявність і функціонування електронної системи каталогізації продукції;
- наявність на підприємствах тих, що відповідають вимогам стандартів ІСО 9000:2000 систем менеджменту якості і т.д.

Враховуючи всі вищенаведені зауваження, можна зробити головний висновок про те, що загальноприйнята схема інтегрованої комплексно-автоматизованої системи технологічної підготовки автоматизованого виробництва (ІСАМ – *Integer Computer Aided Manufacturing*), наведена на рис.1.1 потребує структурного та методологічного вдосконалення.

Особливо важливим є необхідність врахування умов експлуатації найбільш навантажених деталей у виробі не лише на стадії конструювання та

призначення норм точності виробів, але й на етапі проектування технології їх виготовлення. Тобто, засобами паралельного інжинірингу необхідно реалізувати рекурентний та ітераційний взаємозв'язок крос-функціональних етапів технологічної підготовки виробництва: 3D моделювання виробів (CAD-система), імітації умов їх майбутньої експлуатації (CAE-система), проектування структури та параметрів технології їх виготовлення (CAPP-система) та програмування на верстатах з ЧПК (CAM-система). У даному ланцюгу не вистачає лише автоматизованої системи, що реалізує взаємозв'язок між технологією формоутворення виробів з умовами їх потенційної експлуатації. Основи створення такої системи (*Computer Aided Forming* – CAF-система) наведені у роботах [60, 61, 62, 63, 65, 67, 280, 281, 284, 286]. Схема інформаційних потоків між окремими підсистемами при реалізації автоматизованого конструкторсько-технологічного крос-функціонального процесу виготовлення машинобудівної продукції оновленої системи технологічної підготовки виробництва наведена на рис.1.4. [62, 65, 286].

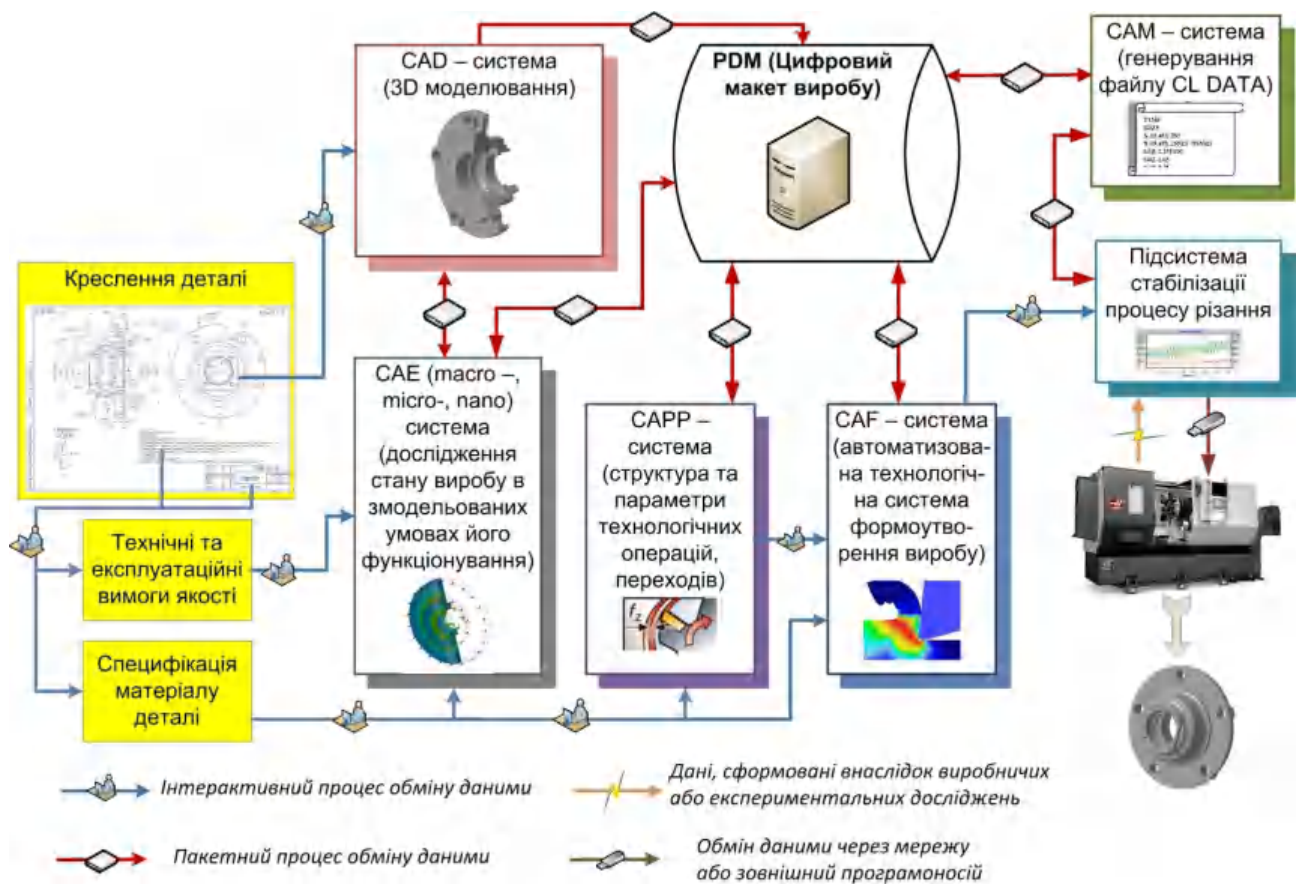


Рис.1.4. Структурна схема модернізованої інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва

Крос-функціональним можна вважати процес, у реалізації якого беруть участь одночасно декілька систем верхнього рівня. З точки зору системотехнічної методології [119, 198, 213], саме такі процеси остаточно реалізують принципи PLM-системи, але тут же виникають і найбільші проблеми їх реалізації. Саме у використанні такого процесу прихований найбільший потенціал підвищення якості машинобудівної продукції. Адже будь-яка складна ієрархічна організація, досягаючи певного розміру, стикається з тим, що локальні критерії роботи окремих підсистем починають переважати над забезпеченням екстремального значення показника глобальної цільової функції. Власне, це не нова ідея: "зламати стіни між підрозділами" - це заклик ще реінжинірингу зразка початку 90-х років [198]. Інша справа, що запропонований класичним реінжинірингом підхід до реалізації ітераційного технологічного проектування через одноразове радикальне перетворення, виявився не цілком вдалим. Сучасна концепція паралельного інжинірингу принесла нові погляди на те, як це потрібно робити, щоб не порушити стратегічної мети проектування. Для ілюстрації крос-функціональних інформаційних процесів часто використовують метафору силосної вежі - "functional silo" [198]. Аналогія тут наступна: після того, як селянин заклад скосене сіно в силосну вежу, добратися він може тільки до невеликої її частини - до верхнього шару. Так само ресурси, інформація, знання, процедури в ієрархічно організованій системі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва виявляються поховані в надрах попередньо реалізованих етапів проектування - велика частина інформації недоступна для розробників з інших підрозділів і не працює на досягнення основної мети проекту. Чисто функціональний погляд на речі спричиняє спотворене уявлення про те, які критерії слід використовувати в результаті виконання окремого етапу підготовки машинобудівного виробництва. Так, наприклад, для етапу проектування структури та параметрів технологічного процесу, що реалізується системою CAPP (Computer-Aided Process Planning), основним критерієм є забезпечення продуктивності виробництва та абстрагованих показників якості - точності розмірів деталі та шорсткості її поверхонь. А забезпечення таких

функціональних показників, як, наприклад, зносостійкість поверхневого шару найбільш відповідальних поверхонь деталі, залишкові деформації, контактна жорсткість деталі, тощо – для даної системи не є доступним. Це, найбільш імовірно, прерогатива роботи CAE системи. Проте і для CAE системи ці дані є недоступними, оскільки для моделювання вищенаведених функцій необхідна інформація, що може бути отримана в результаті роботи системи автоматизованого формоутворення: мікротопологія поверхонь, напружено-деформований стан заготовки тощо!!! Але з точки зору реалізації PLM-концепції все навпаки: забезпечення ефективних експлуатаційних показників виробів - це частина глобальної функції мети (з точки зору цінності машинобудівної продукції для споживача процесу "від замовлення до оплати"), а структура та параметри технологічного процесу - це лише допоміжна внутрішня інформація системи. Безумовно, технологічна інформація необхідна, оскільки при її відсутності неможливо реалізувати виробничий процес. Але все ж таки критерії, прийняті на етапі роботи CAPP системи, глобальними вважати не можна. Функціонування CAPP-системи - це тільки один приклад недосконалості класичного послідовного (неітераційного) процесу технологічної підготовки виробництва.

CAF-системи, що є невід'ємними складовими модернізованої інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (рис.1.4), класифікуються як системи формоутворення різанням (CAF-C), пластичною деформацією (CAF-P), формування поверхневого шару (CAF-S) та формоутворення методами складання (CAF-A) (рис.1.5).



Рис.1.5. Класифікація автоматизованих систем формоутворення виробу

Відповідно до Європейського рейтингу промислової адаптації наукоємної продукції Україна займає лише 58 позицію з 67 учасників рейтингу [244]. За прогнозами фахівців, протягом найближчих років є висока імовірність повного витиснення вітчизняного продукту з міжнародного ринку, не зважаючи на надані Європейським Союзом експортні пільги під час підписання асоціації та на значний експортний потенціал унікальних підприємств важкого, енергетичного, авіаракетного машинобудування України, підприємств військово-промислового комплексу [244]. Одним з найважливіших та найреальніших шляхів приведення машинобудівних підприємств України до рівня ринкової конкурентоспроможності є необхідність запровадження PLM-технологій у сучасному вітчизняному виробництві. Однак, для цього необхідне виконання комплексу організаційних, науково-дослідних, проектних та інших робіт, спрямованих на створення принципово нової концепції інженерної діяльності. Крім того, першочерговим завданням в умовах використання PLM-технологій є формування системи спеціальних нормативно-правових актів, що регулюють способи інформаційного обміну, який замінює традиційний паперовий документообіг. Наприклад, у США на удосконалення,

систематизацію і стандартизацію створених PLM-систем вже витрачено понад 1 млрд.\$ [244]. Обсяги грошових затрат свідчать про велике значення, яке надають західні фахівці проблематиці, пов'язаній з запровадженням PLM-технологій.

На підставі вищенаведеного аналізу сучасних тенденцій розвитку інтегрованих АСТПВ, можна зробити висновок, що для суттєвого підвищення конкурентоспроможності вітчизняної машинобудівної продукції машинобудування необхідно створення якісно нової методології конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, що базується на принципах паралельності та ітераційності взаємопов'язаних крос-функціональних процесів, забезпечуючи, таким чином, увесь життєвий цикл виробу. Особливістю нової методології АСТПВ, що реалізує PLM-концепцію, є проектування т.зв. функціонально-орієнтованих технологій машинобудування.

1.2. Концептуальні проблеми проектування та дослідження об'єктно-орієнтованих та функціонально-орієнтованих технологічних процесів

Ефективна реалізація етапу технологічної підготовки виробництва є найбільш складним, трудомістким і багатоваріантним завданням в системі забезпечення життєвого циклу виробів. У традиційних інтегрованих системах автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва (рис.1.1) використовується класичний алгоритм технологічного проектування, що передбачає виконання ряду послідовних взаємопов'язаних етапів безітераційного низхідного структурно-параметричного синтезу. Тобто, спочатку на основі вхідних даних (як результат роботи САД і САЕ-систем: макроегеометрична конфігурація деталі, матеріал, її розмірно-вагові характеристики, точність геометричних розмірів та взаєморозташування поверхонь, фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі, тип та організаційна форма виробництва) засобами формальної ревалентності формується маршрут механічного оброблення виробу, потім визначається структура технологічних операцій, переходів, призначаються режими

оброблення (CAPP-система), а відтак проектується або підбирається технологічне оснащення, інструмент, складається програма для верстатів з ЧПК (CAM-система). Таке проектування в класифікаційному контексті забезпечення поставленої мети можна вважати об'єктно-орієнтованим [281, 284, 286]. При цьому технолог (або автоматизована технологічна система) повністю абстрагується від проблем функціонального (експлуатаційного) характеру об'єкту виробництва, справедливо вважаючи, що призначення вихідних даних та граничних умов для технологічного проектування (в класичному сенсі - норм точності та якості окремих поверхонь виробу) – це прерогатива конструктора (або автоматизованої CAD/CAE системи) [1, 14, 15, 16, 17, 18]. Проте, копіювання класичного алгоритму прийняття технологічних рішень істотно обмежує потенціал інтегрованої автоматизованої системи підготовки виробництва, не дає можливості комплексної реалізації системи PLM (Product Life Management). Очевидно, що в умовах реальної інженерної практики прогнозування функціональних особливостей виробу і пов'язане з ним призначення норм точності і якості окремих поверхонь виконується конструктором апріорно. Проте, навіть досвідчені конструктори не в змозі системно оцінити вплив таких важливих чинників, як мікротопологія поверхонь, залишкові напруження і деформації поверхневого шару на показники зносостійкості, втомну міцність, мастилоутримуючі і антикорозійні властивості поверхонь і т.п.!

Об'єктно-орієнтоване проектування - проектування складної системи як сукупності об'єктів, що взаємодіють один з одним, кожен з яких - екземпляр певного класу, з використанням принципів абстрагування, модульності, ієрархічності та спадковості властивостей. Комплекс робіт, пов'язаний з технологічним проектуванням нових виробів, включає послідовність робіт по проектуванню, складанню, підготовці технічної документації, їх експериментально-дослідному випробуванню, аналізу експериментальних результатів з рекурентним повторенням циклу аж до отримання потрібного результату (рис.1.1). Тобто, спочатку виконується попередній проект технологічного процесу; на подальших стадіях його уточнюють і

конкретизують на основі детальних технологічних розрахунків. Послідовним уточненням попереднього проекту отримують закінчені розробки технологічного процесу. Найбільш ефективне рішення вдається отримати тільки після розробки і порівняння декількох варіантів технологічних процесів. І основним критерієм такого проектування є забезпечення мінімальної собівартості виробу за умови забезпечення формалізованих показників якості і заданих виробничою програмою об'ємів виготовлення продукції.

Об'єктивні умови розвитку ринкової економіки в сучасних умовах глобалізованого суспільства визначають необхідність цільової орієнтації наукових досліджень, процесів проектування та виробництва продукції машинобудування на формування більш високого рівня якості, ніж у конкурентів протягом всього життєвого циклу продукції [180]. В результаті поступового насичення ринку взаємозамінними виробами-аналогами, ефективність цінової конкуренції знижується, а нецінової (як результат розширення та вдосконалення експлуатаційних та сервісних властивостей виробів) підвищується, що обумовлює актуальність пошуку нових критеріїв оцінки і технологій управління якістю різноманітних технічних систем на кожному з етапів його життєвого циклу. Структурованість якості складає основу фундаментального для кваліметрії принципу функціонально-кібернетичної еквівалентності [121, 122]. Таким чином, впровадження PLM вимагає проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва, тобто врахування вже на стадії технологічної підготовки виробництва не тільки параметрів точності розмірів та шорсткості оброблюваних поверхонь, але й системного комплексу кваліметричних показників, що матимуть суттєвий вплив на забезпечення експлуатаційних, ремонтних, утилізаційних та інших функціональних властивостей виробів [122]. При реалізації функціонально-орієнтованої технологічної підготовки виробництва система не підміняє результати роботи конструктора, а лише доповнює їх такими важливими критеріями, як мікротопологія поверхневого шару, залишкові напруження та деформації тощо [293, 294].

Протягом останніх років формується якісно новий науковий етап розвитку технології машинобудування, що полягає в об'єднанні технологій проектування, виготовлення і експлуатації машин і в розробці наукових основ по системному створенню нових технологічних методів обробки, в тому числі і механо-фізико-хімічних, що дозволяють забезпечити необхідні експлуатаційні властивості деталей машин. Вагомий внесок у створенні базових засад та розвитку цього напрямку внесли такі відомі вчені, як В.Ф.Без'язичний, В.А.Валетов, Д.В.Васильков, Ю.М.Внуков, А.І.Грабченко, І.Є.Грицай, А.А.Гусєв, І.В.Гурей, А.М.Дальський, Н.Б.Демкин, В.О.Залога, С.А.Корчак, І.В.Крагельський, Б.І.Костецький, А.А.Маталін, О.М.Михайлов, В.А.Остаф'єв, Ю.В.Петраков, Н.С.Равська, Е.Б.Рижов, П.Р.Родін, С.С.Сілін, В.К.Старков, А.М.Сулима, А.Г.Суслов, Ю.Г.Шнейдер, П.І. Ящеріцин, R.Black, J.P.Davim, P.Groover, T.Ozel, F.Klocke, G.Smith, M.Yoshimura та інші.

Запропонований у роботах [203, 204] підхід у реалізації функціонально-орієнтованих технологій базується на багаторівневому проектуванні структури технології на кількох рівнях. Між окремими рівнями діють ітераційні та рекурентні зв'язки, що дозволяє синтезувати і коректувати структуру технологічного процесу на базі принципів комбінованих технологій; макро-, мікро- і нанотехнологій та функціонально-орієнтованих технологій. По-суті це і є реалізацією принципу паралельного інжинірингу [84]. Ітераційні і рекурентні зв'язки між окремими етапами проектування технологій дозволяють, по перше - послідовно виконувати синтез структури технологічного процесу на базі всіх етапів композиційних технологій, по-друге - виконувати повернення процесу проектування на попередні етапи, коректуючи розроблену раніше структуру і параметри технологічного процесу, і по-третє - при синтезі технології обходити окремі етапи проектування як в прямому, так і в зворотному напрямках [180].

Запропонована в роботах [45, 203, 204] узагальнена схема синтезу функціонально-орієнтованої технології представлена на рис.1.6. Цей процес слід реалізувати ітераційно на базі граничного критерію якості та ефективності, наприклад, з використанням методів оптимізації технологічних процесів. Така

методологія технологічного проектування дозволяє реалізувати якісно нову сукупність властивостей і ступінь корисності виробу.

Функцію технологічних перетворень виробу в роботі [204] представлено за допомогою наступного виразу:

$$\varphi: C_v \rightarrow C_w \quad (1.1)$$

де φ - функція перетворень;

C_v - вектор початкових властивостей (показників якості) заготовки;

C_w - вектор кінцевих властивостей (показників якості) виробу.

$$C_v = \begin{Bmatrix} C_{v1} \\ C_{v2} \\ \dots \\ C_{vR} \end{Bmatrix} \quad C_w = \begin{Bmatrix} C_{w1} \\ C_{w2} \\ \dots \\ C_{wS} \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

де C_{vi}, C_{wj} - і-й та j-й елементи множин C_v та C_w , відповідно.

В роботах [45, 204] наголошується, що процес врахування особливостей функціонально-орієнтованих технологій слід реалізувати на всіх етапах життєвого циклу виробу, а саме: аналізу виробу, конструкторського проектування, виготовлення, функціонування, модернізації та утилізації (рис.1.7). Причому необхідно враховувати всі експлуатаційні особливості виробу в машині. Це і зосереджені контактні напруження, і нерівномірний розподіл питомих навантажень, залишкових напружень розтягу, стиску, згину, процесів зношування та втомної міцності елементів тощо.

В роботах А.Г.Суслова та О.М.Михайлова [45, 204, 293, 294, 295] сформульовані основні принципи створення функціонально-орієнтованих технологій, що базуються на таких положеннях:

1. У технології машинобудуванні кожен виріб прийнято розбивати на виконавчі поверхні, і технологічний процес проектувати, ґрунтуючись на визначеній послідовності забезпечення властивостей цих виконавчих поверхонь.

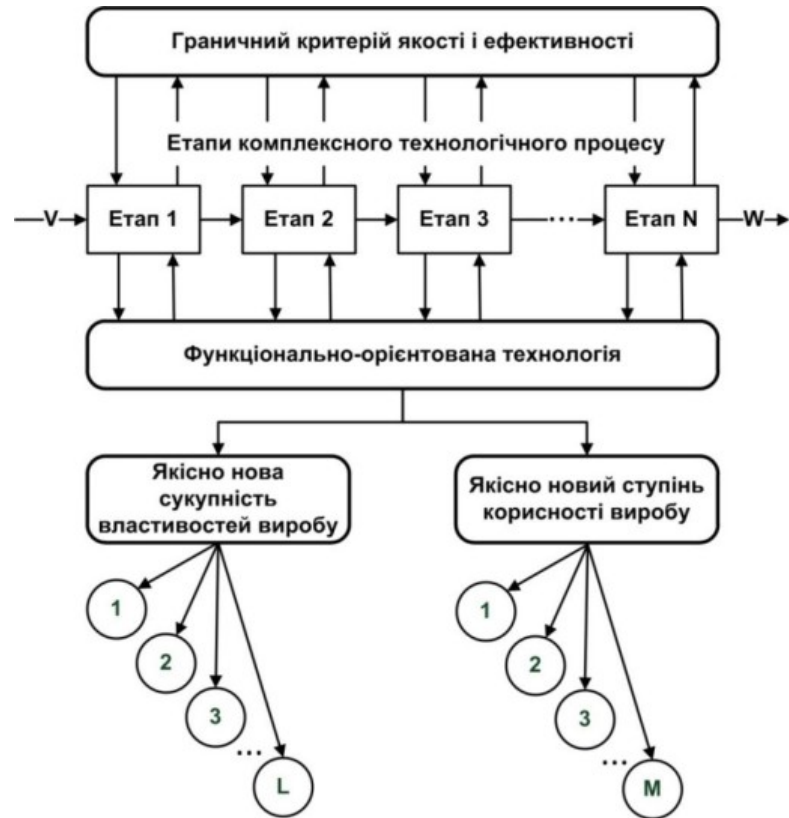


Рис.1.6. Схема реалізації функціонально-орієнтованої технології по етапах комплексного технологічного процесу виготовлення виробу (L - загальна кількість властивостей виробу, M - потужність множин різних видів використання виробу)

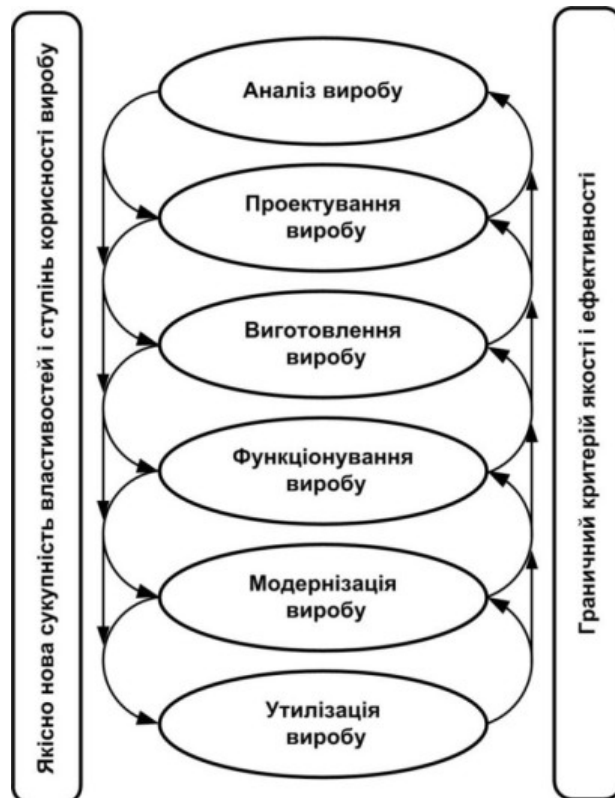


Рис.1.7. Етапи життєвого циклу виробу

2. Між конструктивно-точнісними властивостями кожного функціонального елемента виробу, особливостями його експлуатації в машині і технологічними операціями та переходами їх оброблення існують певні зв'язки. Ці зв'язки в функціонально-орієнтованих технологіях необхідно встановити і формалізувати.

3. Реалізацію технологічних впливів на кожен функціональний елемент виробу необхідно виконувати з можливістю забезпечення зміни його властивостей у просторі і в часі залежно від особливостей експлуатації функціонального елемента виробу в машині або технологічній системі, а також залежно від заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу виробу в цілому.

Таким чином, зв'язок між функціональними властивостями виробу та технологією їх забезпечення повинен носити прогностичний характер. Очевидно, що експериментальні дослідження у випадку необхідності прийняття оперативного технологічного рішення є вкрай небажаними через значну трудомісткість та відсутність можливості диференційованого аналізу впливу окремих чинників на результат проектування. Наприклад, аналіз впливу геометрії різального інструменту, його коливань у всіх напрямках, деформаційні явища (в т.ч. залишкові) мають суттєвий вплив на мікротопографію поверхні. Проте проаналізувати їх вплив диференційовано можна лише використавши можливості комплексного імітаційного реологічного та аналітичного моделювання, а експериментальним шляхом можна лише підтвердити адекватність їх сукупного впливу на формування мікроегеометрії остаточно [103]. Таким чином, для інтегрованої системи автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва можна використати 2 альтернативні концепції технологічного проектування - об'єктно-орієнтоване (ООТ) (табл.1.1) та функціонально-орієнтоване проектування (ФОТ) (табл.1.2).

Табл.1.1. Загальна характеристика об'єктно-орієнтованих технологій машинобудування

Вхідні дані для проектування	Джерела надходження вхідної інформації	Принцип побудови та критерії оптимізації структури і параметрів технологічного процесу	Переваги об'єктно-орієнтованого проектування	Недоліки та проблеми реалізації об'єктно-орієнтованого проектування
Макрогеометрична конфігурація деталі	Проектно-конструкторська документація, система CAD, система MacroCAE	Принцип побудови структури технологічного процесу: Метод аналізу: алгоритмічний пошук структурного прототипу за конструкторсько-технологічними ознаками і корекція його параметрів у відповідності до вхідних даних на проектування	Адекватність формалізації вхідної інформації	Неможливість врахування функціональних властивостей деталі в умовах її майбутньої експлуатації
Матеріал деталі			Наявність ґрунтовної теоретичної бази знань для прийняття оптимального технологічного рішення	
Розмірно-вагові характеристики		Критерії оптимізації: забезпечення мінімальної собівартості виготовлення об'єкту виробництва при дотриманні формалізованих показників якості і заданих виробничою програмою об'ємів виготовлення продукції, з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва	Алгоритмічна простота технологічного проектування	Структурна жорсткість: відсутність ітераційних та рекурентних зв'язків з іншими етапами інтегрованої системи підготовки виробництва
Точність геометричних розмірів		Організаційна та проектно-конструкторська документація, програма випуску продукції	Наявність значної кількості програмних продуктів, що реалізують принцип прототипування технологічних рішень (CAPP та CAM системи)	
Точність взаєморозташування поверхонь				Неможливість реалізувати принцип паралельного інжинірингу
Фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі				
Тип та організаційна форма виробництва				

Табл.1.2. Загальна характеристика функціонально-орієнтованих технологій машинобудування

Вхідні дані для проектування	Джерела надходження вхідної інформації	Принцип побудови та критерії оптимізації структури і параметрів технологічного процесу	Переваги функціонально-орієнтованого проектування	Недоліки та проблеми функціонально-орієнтованого проектування
Геометрична форма окремої функціональної поверхні деталі	Проектно-конструкторська документація, система CAD	<p>Принцип побудови структури і параметрів технологічного процесу: Метод синтезу: алгоритмічний синтез оптимальної структури та параметрів окремих технологічних переходів, операцій, що базується на прогностичних результатах імітаційного реологічного моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану виробу в процесі його формоутворення</p>	Формалізація рекурентних зв'язків між результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробу дає змогу забезпечити оптимальний комплекс його функціональних кваліметричних показників	Складність врахування макрогеометричних параметрів деталі для формування структури технологічного процесу
Специфікація матеріалу деталі (в т.ч. аналітичні залежності його дислокаційної кінетики, крива термо-деформаційного зміцнення, критерії руйнування тощо)	Спеціалізована база даних			Необхідність структурної інтеграції та забезпечення єдиного STEP формату обміну даних між окремими CAD/CAE/CAPP/CAF/ /CAM системами (CAPE технологія) (ISO 10303)
Мікротопологія поверхневого шару окремої функціональної поверхні деталі	Проектно-конструкторська документація, система CAF, система CAPP, система CAE (в т.ч MacroCAE, MicroCAE, NanoCAE)		Повна відповідність концепції PLM	Відносна складність формалізації вхідних даних для проектування
Залишкові напруження (I, II і III роду)			Необхідність впровадження автоматизованої технологічної системи формоутворення виробу (CAF – система)	
Напружено-деформований та термодинамічний стан заготовки в зоні стружкоутворення			Необхідність суттєвого вдосконалення існуючої CAE системи (MicroCAE, NanoCAE)	
Наклеп поверхневого шару окремої функціональної поверхні		Забезпечення системної інтеграції автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва (CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM) засобами паралельного інжинірингу		

Співставлення вищенаведених концепцій технологічного проектування, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Методологічні принципи побудови ООТ та ФОТ суттєво відрізняються. Так, основним критерієм при оптимізації структури і параметрів об'єктно-орієнтованого технологічного процесу є мінімальна собівартість виготовлення об'єкту виробництва при дотриманні формалізованих показників якості і забезпечення заданих виробничою програмою об'ємів виготовлення продукції, з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва. При виборі оптимального функціонально-орієнтованого технологічного процесу функцією мети є інтегральний кваліметричний показник, що системно характеризує комплекс експлуатаційних характеристик поверхонь виробу і отримується як результат формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень і деформацій.

2. Основною перевагою ООТ є алгоритмічна простота технологічного проектування та наявність ґрунтовної теоретичної бази знань для прийняття оптимального технологічного рішення. Проте, така методологія не повністю відповідає концепції PLM (через неможливість врахування функціональних властивостей деталі в умовах її майбутньої експлуатації), та не допускає можливості реалізації принципу паралельного інжинірингу (внаслідок відсутності ітераційних та рекурентних зв'язків з іншими етапами інтегрованої системи підготовки виробництва).

3. Основною проблемою впровадження ФОТ є складність структурної інтеграції та забезпечення єдиного формату обміну даних між окремими CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM системами (CAPE технологія). Проте виконання цієї вимоги у будь-якому випадку декларується міжнародним стандартом ISO 10303. Перевагою даної методології є повне забезпечення вимог концепції PLM в частині формалізації рекурентних зв'язків між результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробу, що дає змогу забезпечити оптимальний комплекс його функціональних кваліметричних показників. Таким чином відбувається системна інтеграція автоматизованих систем

технологічної підготовки виробництва (CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM) засобами паралельного інжинірингу.

4. Впровадження функціонально-орієнтованого технологічного проектування ставить проблему суттєвого вдосконалення існуючого комплексу CAD/CAE/CAPP/CAM програмних продуктів шляхом впровадження автоматизованої технологічної системи формоутворення виробу (CAF – системи) та модернізації існуючої CAE системи (розробка підсистем MicroCAE та NanoCAE).

5. Приймаючи до уваги позитивні та негативні особливості використання альтернативних концепцій технологічного проектування, можна рекомендувати застосування алгоритму вибору оптимальної структури та параметрів технологічних процесів за концепцією функціонально-орієнтованого проектування *тільки для деталей, які мають функціонально-важливі поверхні, що підлягають в процесі експлуатації підвищеним механічним, температурним, хімічним, триботехнічним навантаженням або їх поєднанням*. Але саме такі деталі найчастіше забезпечують експлуатаційну якість виробу в цілому. Для виробів, які не відповідають цим умовам функціонування, доцільно використовувати алгоритм, що реалізує традиційну концепцію об'єктно-орієнтованого технологічного проектування. Проте, найбільш оптимальною методологією є *комбінування альтернативних концепцій проектування*, що полягає у попередньому пресинтезі структури і параметрів технологічного процесу з врахуванням макрогеометричних показників виробу (етап об'єктно-орієнтованого проектування) і наступній корекції цих технологічних параметрів, виходячи із змодельованих потенційних та критичних умов майбутньої експлуатації цього виробу (етап функціонально-орієнтованого проектування). Таким чином можна суттєво оптимізувати за критерієм складності процес технологічної підготовки виробництва, максимально використавши потенціал існуючих програмних продуктів АСПВ, реалізуючи при цьому PLM технологію.

1.3. Огляд сучасних методів імітаційного моделювання процесів формоутворення деталей в машинобудуванні

У розвиток методів дослідження процесів імітаційного реологічного моделювання внесли вагомий внесок такі вчені як О.М.Афонін, С.С.Добротворський, В.О.Залога, Д.В.Криворучко, М.П.Мазур, Н.С.Равська, А.Є.Родигіна, J.P.Davim, F.Klocke, S.K.Lee, J.Gardner, T.Altan, T.C.H. Childs, S.Hoppe, T. Ozel, P.J. Arrazola , P.Zeng, M. Storchak.

Важливим етапом синтезу функціонально-орієнтованих технологій, що базується на ітераційних і рекурентних зв'язках є прогностичний аналіз імітаційної реологічної моделі окремих технологічних переходів та операцій механічного оброблення функціонально-важливих поверхонь виробу. Наповнення репозиторія даних шляхом вдосконалення цифрового макету виробу відбувається вже на стадії підготовки виробництва, а не в результаті експериментального дослідження результатів виготовлення дослідного взірця [174, 175, 176].

Розробка теоретичних основ процесів формоутворення передбачає дослідження напружено-деформованого та термодинамічного стану інструменту і заготовки. Напружено-деформований стан лезового інструменту має пружний характер і при відомих полях напружень в плямі контакту інструменту і заготовки може бути достатньо точно розрахований з необхідною точністю [175]. Натомість для визначення контактних напружень заготовки необхідно знати напружено-деформований стан в умовах її пластичної деформації та руйнування через вичерпання запасу пластичності. Тобто, в заготовці під час механічного оброблення виникає локальне джерело напруження, що значно перевищує межу текучості. При цьому деформується лише поверхневий шар заготовки (як правило, на глибину не більше 5 мм), проте ступінь деформації може досягати 60% і більше [83]. Зона пластичності при різанні є складної форми з високоградієнтним нерівномірним розподілом напруження, деформацій, швидкостей деформацій і температури.

Багато дослідників намагалися застосовувати методи теорії пластичності для аналізу процесу різання. Найбільша кількість досліджень виконана з використанням методу ліній ковзання, у рамках якого, може бути використана тільки ідеалізована жорстко-пластична модель оброблюваного матеріалу [175]. Методи аналізу пластичної течії в зоні стружкоутворення, які застосовані в класичних роботах з теорії різання [44, 89, 111, 117, 186, 232, 327] відносяться до наближених інженерних методів і не дозволяють відповісти на цілу низку важливих для теорії і практики запитань, а тим більше дати кількісну оцінку таких чинників, як вплив геометричних параметрів інструменту на силу різання, величину усадки стружки, інтенсивність залишкових деформацій обробленої поверхні тощо.

Специфічний характер пластичної деформації при різанні є дуже складним, багатофакторним, що створює значні труднощі для його дослідження. Для формалізації цих процесів слід використати основні положення реології матеріалів. Реологія вивчає деформаційні властивості реальних об'єктів та діючі на них зворотні та незворотні (залишкові) напруження та деформації, особливо в умовах дії високих температур. Зміна реологічного стану об'єкту дослідження відбувається внаслідок зміни внутрішнього енергетичного стану, які характеризуються роботою, що здійснюється за рахунок протікання різних процесів, в даному випадку за рахунок процесів пластичної течії металів в процесі формоутворення поверхонь. В загальному вигляді роботу, здійснювану при протіканні цих процесів, можна представити у вигляді [179]:

$$A = \int f(F) dx \quad (1.3)$$

де $f(F)$ – сила різання;

x – параметри (режими) різання.

Таким чином, оскільки локальна пластична деформація при механічному обробленні деталей носить складний, об'ємний характер, аналітичний опис процесів деформування є дуже складною задачею. Визначення напружень і

деформацій вимагає пошуку рішення системи рівнянь рівноваги напружень [83, 179]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

з умовою пластичності Мізеса – Губера:

$$\sigma_s = \frac{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}}{2}, \quad (1.5)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ і $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}$ – компоненти тензора напружень;

σ_s – напруження текучості.

Рішення даної системи рівнянь [83] повинно задовольняти статичним:

$$\begin{cases} \sigma_x a_x + \tau_{xy} a_y + \tau_{xz} a_z = S_x; \\ \tau_{xy} a_y + \sigma_y a_y + \tau_{yz} a_z = S_y; \\ \tau_{zx} a_x + \tau_{zy} a_y + \sigma_z a_z = S_z \end{cases} \quad (1.6)$$

і кінематичним $u_0 \cos(n, u_0) = u_j \cos(n, u_j)$ граничним умовам, де:

a_x, a_y, a_z – направляючі косинуси нормалі до елемента поверхні заготовки;

S_x, S_y, S_z – компоненти вектора напруження S , прикладені до елемента поверхні деформованої заготовки;

(n, u_0) і (n, u_j) – кути між внутрішньою нормаллю n до контактної поверхні тіла F_k і швидкостями переміщень інструменту u_0 і деформованого матеріалу u_j .

Процес стружкоутворення базується на методі «ерозії елементів», який полягає в еволюції тріщини, залежної від стану напруження та деформацій в тілі заготовки. Застосування такого закону включає два критерії. Перший критерій характеризує необхідну міру руйнування матеріалу, а другий – відповідає за еволюцію тріщини, її поширення і рух дислокацій.

Адаптований критерій руйнування взаємозв'язаний із законом Джонсона-Кука [174, 175]. Руйнування почнеться для кожного елемента, починаючи з моменту коли настає умова:

$$\omega = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f}, \quad (1.7)$$

де $\Delta \bar{\varepsilon}$ - інкремент результуючої пластичної деформації;

$\bar{\varepsilon}_f$ - результуюча деформація руйнування матеріалу.

Модель руйнування Джонсона-Кука враховує термомеханічні процеси при великих деформаціях. Значення результуючої пластичної деформації руйнування може бути представлено у вигляді [175]:

$$\bar{\varepsilon}_f = \left[D_1 + D_2 \cdot \exp(D_3 \cdot \sigma^o) \right] \cdot \left[1 + D_4 \cdot \ln \bar{\varepsilon}^o \right] \cdot \left[1 + D_5 \cdot T^o \right] \quad (1.8)$$

де $\sigma^o = \frac{\sigma_m}{\sigma}$ - відношення середнього напруження (σ_m) результуючого еквівалентного напруження (по Мізесу) ($\bar{\sigma}$);

$\bar{\varepsilon}^o = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o}$ - безрозмірний коефіцієнт залежності пластичної деформації з розрахунковою швидкістю деформації $\dot{\varepsilon}$ до нормалізованої межі чутливості до швидкості деформації $\dot{\varepsilon}_o$;

$T^o = \frac{T - T_o}{T_f - T_o}$ - температурний коефіцієнт еквівалентності, що визначає відношення різниці поточної і початкової температури до різниці температури плавлення T_f до початкової температури T_o заготовки в зоні різання;

D_1 - початкове значення деформації руйнування;

D_2 - нормативний експотенційний фактор;

D_3 - фактор тривісності;

D_4 - фактор швидкості деформації;

D_5 - нормативний тепловий чинник [174].

Аналітичне рішення такої системи рівнянь є вкрай складним та неадекватним. Аналіз методів математичного моделювання полів напружень і деформацій при пластичній деформації дозволив зробити висновок про перспективність застосування для дослідження процесу формоутворення методу скінченних елементів (МСЕ), що дозволяє вирішувати геометрично складні тривимірні задачі з одночасним моделюванням полів напружень в інструменті та заготовці з урахуванням особливостей їх контактної взаємодії [234].

Ідея МСЕ полягає в тому, що будь-яку безперервну величину можна апроксимувати дискретною моделлю, яку будують на безлічі локально-безперервних функцій, визначених на кінцевому числі областей. Ці функції знаходять за допомогою значень безперервної величини в кінцевому числі точок даної області. Останню розбивають на кінцеве число простих за формою об'ємів — кінцевих елементів (КЕ), які з'єднуються один з одним в точках, що називаються вузлами. Найбільш важливими перевагами МСЕ, завдяки яким його можна використати для дослідження полів напружень і деформацій при різанні, є наступні [174, 175, 185]:

- МСЕ дозволяє вирішувати контактні завдання з одночасним дослідженням напружено-деформованого стану інструменту і заготовки.
- Властивості матеріалів суміжних КЕ можуть бути різними. Це дозволяє застосовувати МСЕ до тіл, що складаються з різнорідних матеріалів. Зокрема, при моделюванні різання лезовим інструментом за допомогою МСЕ можна одночасно визначати поля напружень в інструменті з пружного матеріалу і в заготовці з пластичного матеріалу.
- Криволінійна область може бути апроксимована за допомогою прямолінійних КЕ або точно описана за допомогою криволінійних КЕ. Це дозволяє моделювати контактну взаємодію інструменту і заготовки, що мають складну просторову форму.

– Розміри КЕ можуть бути змінними. Це дозволяє укрупнювати або подрібнювати кінцево-елементну сітку, що важливо при дослідженні області локальної деформації.

Основний недолік МСЕ, як і усіх чисельних методів, полягає в тому, що він дає лише часткові рішення для конкретних умов моделювання, не дозволяючи виявити характер впливу незалежних змінних на залежні [176, 185]. Проте це завдання можна вирішити, зробивши за допомогою МСЕ регресійний аналіз результатів моделювання формоутворення варіюванням в необхідних межах незалежних змінних (режимів та схем різання, геометрії і механічних властивостей матеріалів інструменту і заготовки тощо).

Сучасні системи інженерного аналізу, що реалізують МСЕ, дозволяють визначати поля напружень і деформацій в пружній і пластичній областях, а також досліджувати контактну взаємодію двох і більше тіл. Це дає змогу проводити інтегрований розрахунок напруженого стану інструменту і заготовки при різанні. На сьогоднішній день в машинобудуванні застосовують багато різних САЕ-систем, як універсальних (ANSYS, MSC. Nastran, CosmosWorks і т.д.), так і спеціалізованих (QForm, LS-Dyna, AdvantEdge, DEFORM і т.д.)

Універсальні САЕ -системи призначені для дослідження фізичних полів різної природи (напружень і деформацій, електромагнітних, теплових тощо) і рішення пов'язаних з ними прогнозуючих завдань. Усі такі системи використовують лагранжеві КЕ, вузли яких належать матеріалу заготовки. При деформації заготовки ці КЕ деформуються і сітка трансформується. Внаслідок значного спотворення форми КЕ у вогнищах деформації часто виникає помилка типу «негативний яacobіан». Це відбувається при досягненні негативного значення визначника матриці Яcobі (матриці, що складається з координат вузлів КЕ). Тому універсальні САЕ -системи не можуть ефективно моделювати значні пластичні деформації [326].

Для прогнозного дослідження процесу механічного оброблення доцільно використати спеціалізовані програмні комплекси, такі як DEFORM-3D (Scientific Forming Technologies Corp.), ABAQUS (Dassault Systèmes Corp.),

AdvantEdge (EnginSoft Corp.), LS-DYNA (Livermore Software Technology Corp.) [11, 44, 89, 111, 117, 175, 186, 232, 327]. Всі ці системи є багатоцільовими програмами МКЕ аналізу і призначені для вирішення тривимірних динамічних нелінійних завдань механіки деформованого твердого тіла, а також пов'язаних з цим процесом завдань. В них реалізовані явний і неявний метод кінцевих елементів з можливістю побудови лагранжевої, ейлерової і гібридної сітки, багатокomпонентна гідродинаміка, метод згладжених ґраток, оснований на методі Галеркіна. Програми мають вбудовані процедури автоматичної перебудови і згладжування звичайно-елементної сітки при виродженні елементів, високоефективні алгоритми рішення контактних задач, широкий набір проблемно-орієнтованих специфікацій матеріалів, можливості користувацького програмування.

Одним зі світових лідерів в цій області є спеціалізована система DEFORM 3D (2D), розроблена компанією Scientific Forming Technologies Corp. (США) [11, 69, 83].

На відміну від реального виробництва, де результати аналізу структури та параметрів процесів різання можна отримати лише через тривалий проміжок часу, комп'ютерне моделювання дозволяє зробити це набагато більш оперативно, без витрат на експериментальні та виробничі дослідження. При цьому технолог може заглянути «всередину» процесу, що неможливо на виробництві, простежити за руйнуванням та деформацією матеріалу, побачити можливі дефекти тощо. Крім того, DEFORM включає можливості дослідницької лабораторії і дозволяє отримати інформацію про напружено-деформований стан заготовки на різних етапах деформації, про розподіл температури, її макро- і мікроструктуру, про напруження в інструменті, діюче зусилля процесу різання, форму стружки та інше [275]. Оперативно володіючи усією цією інформацією, технолог краще уявляє собі цей технологічний процес, може оцінити вплив на нього різних чинників, прогнозує можливі шляхи його трансформації та оптимізації. Прогнозування цих факторів може суттєво вплинути на ефективність механічного оброблення, забезпечення параметрів

точності та продуктивності технологічної операції [287, 288]. В той же час, теоретичні дослідження механіки процесу різання металів, в основному, засновані на віртуальних обмеженнях (ізотропія та однорідність властивостей матеріалу зрізаного шару і тому подібне), що виключає аналіз впливу характерних для поверхневого пластичного деформування властивостей матеріалу і їх розподілу по перерізу зрізаного шару; а також практично унеможливує дослідження взаємозв'язку деформаційного зміцнення матеріалу з питомими енергетичними характеристиками обробки.

Інший всесвітньо відомий програмний комплекс - ABAQUS є одним з лідерів в галузі МСЕ розрахунків на міцність, за допомогою якого можна отримувати точні і достовірні рішення для найскладніших лінійних і нелінійних інженерних проблем. Сімейство продуктів ABAQUS розробляється і підтримується компанією ABAQUS, Inc. (США) з 1978 року. З 2005 року ABAQUS, Inc. корпоративно входить в компанію Dassault Systemes (розробник всесвітньо відомої САD системи CATIA і систем управління життєвим циклом виробів PLM SmarTeam і Enovia). Стратегією подальшого розвитку ABAQUS є створення абсолютно нового універсального середовища моделювання SIMULIA, яке буде узагальнювати не тільки всі рішення компаній Dassault Systemes і ABAQUS, Inc. в області розрахунків на міцність, але і об'єднувати кращі рішення третіх фірм для створення потужного інструментарію для реалістичного проектування та комплексного аналізу конструкцій в процесі їх виготовлення та експлуатації [116].

Програмний комплекс SIMULIA/ABAQUS дозволяє врахувати всі нелінійності, як фізичні, так і геометричні, має велику бібліотеку кінцевих елементів і дозволяє досліджувати різномінітні моделі матеріалів, таких як метали, пластмаси, композити тощо. Програмний комплекс SIMULIA/ABAQUS розроблений за модульним принципом. Він складається з основних модулів - вирішувачів (солверів) ABAQUS/Standard і ABAQUS/Explicit, препроцесора ABAQUS/CAE і додаткових модулів, які враховують особливості специфічних проблем (ABAQUS/Design, FE-Safe).

ABAQUS/Standard підтримує адаптивну регенерацію сітки, що може значно покращити якість результатів внаслідок автоматизації уточнення сітки з метою досягнення наперед заданого ступеня точності. Адаптивна регенерація сітки так само корисна для уточнення сітки в специфічних зонах, таких як концентратори напружень або в зоні значних пластичних деформацій (рис.1.9) [9].

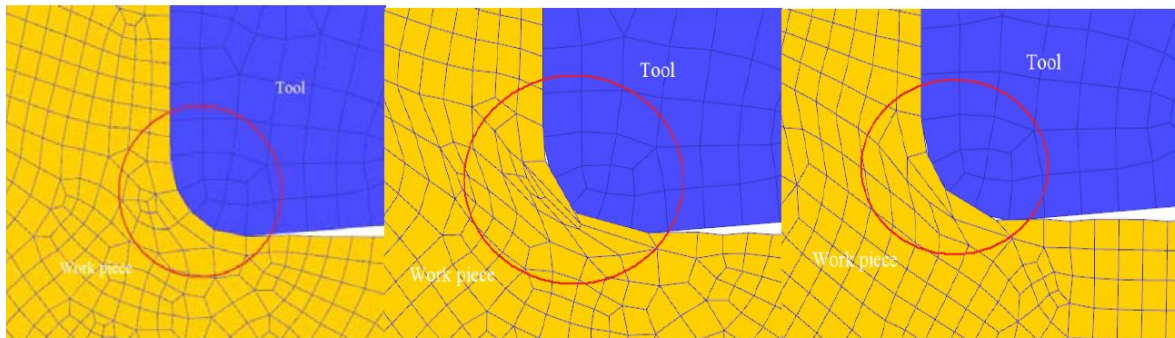


Рис.1.9. Процедура перебудови кінцево-елементної сітки в зоні різання : (а) – вихідний стан сітки; (б) – сітка в стані деформації; (в) – регенована сітка.

Однією з найбільш ефективних систем імітаційного моделювання процесів формоутворення є система LS-DYNA. LS-DYNA (продукт компанії LSTC) - багатоцільовий програмний комплекс, призначений для розв'язання тривимірних динамічних нелінійних задач механіки деформованого твердого тіла, механіки рідини і газу, теплопровідності тощо [206]. Ця система була першою у своїй області і стала основою для більшості сучасних пакетів високонелінійного динамічного аналізу. У програмному комплексі LS-DYNA реалізовані ефективні методи розв'язання перелічених задач, у тому числі явний (explicit) і неявний (implicit) методи скінченних елементів, багатокомпонентна гідродинаміка (Multimaterial Eulerian Hydrodynamics), обчислювальна гідродинаміка нестискуваних потоків, безсітковий метод згладжених ґраток (SPH -Smoothed Particle Hydrodynamics), безсітковий метод, заснований на методі Галеркіна (EFG - Element Free Galerkin method) тощо. У LS-DYNA реалізовані процедури автоматичної перебудови і згладжування скінченно-елементної сітки при виродженні елементів, адаптивні лагранжеві-

ейлереві сітки (ALE - Arbitrary LagrangianEuleran), високоефективні алгоритми розв'язання контактних задач, широкий набір моделей матеріалів, можливості користувацького програмування, а також процедури лагранжевого-ейлерового зв'язування і розрахунку багатокомпонентних потоків стиснених середовищ на рухомих ейлеревих сітках. Програмний код LS-DYNA оптимізовано під основні платформи та операційні системи, векторизовано, розпаралелено для систем із спільною (SMP) і розподіленою пам'яттю (MPP) [174, 175, 206].

У таблиці 1.3 наведені результати порівняльного аналізу моделювання процесів механічної обробки у найбільш відомих CAE-системах [116].

Табл. 1.3. Таблиця порівняльних характеристик CAE систем

	ANSYS Workbench	LS-Dyna	ABAQUS	DEFORM	AdventEdge
Створення геометрії	++	+++	+++	+++	++
Накладення сітки	+++	+	++	++	+++
Задання матеріалів	+++	+	++	+++	++
Граничні умови	+++	+	++	+++	+++
Обчислення	+	+++	++	++	++
Результати	++	+++	++	++	++
Робота з композиційним матеріалом	Так (модулі ACP)	Так (бібліотека типів матеріалів)	Так	Ні	Ні

Умовні позначення до таблиці 1:

Створення геометрії: +++ - Доступно ескізне моделювання, експорт та імпорт геометрії, зміна геометричних параметрів об'єктів і положення в просторі. ++ - Доступно ескізне моделювання, експорт та імпорт геометрії, зміна геометричних параметрів об'єктів, переміщення в просторі неможливо.

Накладення сітки: +++ - Гнучке налаштування параметрів сітки (розмір елементів, інтенсивність, згущення, тип елементів і т.п.), автоматичне накладення сітки з оптимізацією під форми і розміри об'єкта. ++ - Зміна розміру елементів сітки, вибір типу елементів, автоматичне накладення сітки з ручним налаштуванням форми і розмірів об'єкта. + - Зміна розмірів елементів сітки. Безсітковий метод (SPH).

Задання матеріалів: +++ - Бібліотека матеріалів, додавання нових параметрів в готові матеріали з бібліотеки, створення нового матеріалу та

занесення в бібліотеку. ++ - Бібліотека матеріалів відсутня, але збережена можливість додавання нового матеріалу. + - Бібліотека матеріалів відсутня, включена бібліотека типів матеріалів з налаштуванням властивостей. Можливість додавання нових матеріалів або типів відсутня.

Задання граничних умов: +++ - Завдання зовнішніх чинників (гравітація, температура навколишнього середовища і т.п.). Простий інтерфейс. Автоматичне накладення зв'язків між об'єктами. ++ - Установка зовнішніх факторів. Напівавтоматична накладення зв'язків між об'єктами з налаштуванням властивостей контакту (сила тертя, температура в зоні зіткнення та інші). + - Ручне налаштування граничних умов. Вибір типу контакту між об'єктами, із заповненням потрібних для розрахунку властивостей.

Обчислення: +++ - Повний контроль параметрів розрахунку (час всього процесу, крок розрахунку, кінетична енергія в обраних вузлах та інші). ++ - Автоматичний процес обчислення із зазначенням кроку розрахунку. Зупинка і продовження розрахунку. Візуальне відображення про хід обчислення. + - Анімація, збереження відео. Візуальні покази про хід процесу без графічного спектра величин розрахунку

Загальний аналіз утилітарності зазначених вище CAE-систем дозволяє зробити наступні висновки [116]:

1. Створення геометрії: Відмінна сторона LS-DYNA, ABAQUS і DEFORM полягає в переміщенні моделей незалежно від обраної системи координат (не мають прив'язки до неї).
2. Накладення сітки: ANSYS Workbench і AdventEdge мають гнучке налаштування параметрів сітки. Програмний продукт LS-DYNA включає також безсітковий метод (SPH - метод згладжених ґраток).
3. Завдання матеріалів: Перевага програмних засобів SYS Workbench, AUTODYN і DEFORM полягає в широкому виборі матеріалу з вбудованою бібліотеки. У програмі LS-DYNA присутній лише перелік типів матеріалів.

4. Формулювання граничних умов: ANSYS Workbench, DEFORM і AdventEdge мають здатність накладення граничних умов в автоматичному режимі, змінюючи при цьому параметри умов під процес моделювання.
5. Обчислення: Особливість повного контролю над процесом розрахунку має програмний засіб LS-DYNA. У програмних продуктах AUTODYN, ABAQUS, DEFORM і AdventEdge обчислення проходить в автономному режимі з візуальним відображенням про його хід.
6. Подання результатів дослідження: LS-DYNA здатна в ручному режимі до початку обчислення налаштовувати параметри виведення результатів. У продуктах ANSYS Workbench, ABAQUS і AdventEdge є тільки візуалізація результатів.
7. Робота з композиційними параметрами: В ANSYS Workbench для роботи з композитами існують модуль ACP (Ansys Composite PrePost). У LS-DYNA є бібліотека типів матеріалів, призначена для моделювання композитних матеріалів.

Окремо слід приділити увагу програмним продуктам, які доцільно використовувати для реологічного моделювання механічної обробки різанням. DEFORM у своєму складі має спеціальний шаблон для механооброблення, що дозволяє створювати модель поетапно в інтерактивному режимі. Користувачеві досить вибрати тільки тип операції, задати режими обробки, інструмент і заготовку. У DEFORM немає свого модуля проектування геометричних моделей, але є декілька спеціальних компонентів, що дозволяють генерувати твердотільні моделі окремих типів заготовок та інструментів (наприклад, свердл) на основі їх геометричних розмірів. Після виконання розрахунку можна переглянути результати, представлені у вигляді графічних полів і графіків. ANSYS Workbench має досить зручний інтерфейс, що дозволяє налаштувати всі основні умови і параметри. Від користувача потрібно лише вказати вхідні дані (матеріали, моделі об'єктів, генеровані сітки і т.п.), граничні умови (швидкість і напрямок руху, зовнішні фактори, місця кріплення об'єктів і т.п.) і те, що він

хоче побачити в результаті обчислення. ANSYS автоматично підбере всі параметри обчислень за отриманими від користувача даними. По закінченню обчислень можна вивести результат у графічному форматі і текстовий варіант всіх вхідних даних і кінцевих результатів у вигляді таблиць. У LS-DYNA для отримання подібного результату користувачеві доведеться налаштовувати все вручну, починаючи від внесення часу переміщення об'єкта і навантаження, яке повинно бути розподілено від початку руху до кінця шляху, закінчуючи контролем за вихідними параметрами. Основна перевага даної системи полягає в тому, що користувач сам контролює весь процес механооброблення і може впливати на хід обчислення і на формат результатів [116].

Таким чином, можна зробити висновок про те, що базовими програмними продуктами автоматизованої системи формоутворення виробів (CAE-системи) можуть бути такі відомі програмні комплекси як DEFORM-3D (Scientific Forming Technologies Corp.), ABAQUS (Dassault Systèmes Corp.), AdvantEdge (EnginSoft Corp.), LS-DYNA (Livermore Software Technology Corp.) [3]. Всі ці системи є багатоцільовими програмами МКЕ аналізу і призначені для вирішення тривимірних динамічних нелінійних завдань механіки деформованого твердого тіла, а також пов'язаних з цим процесом завдань. Програми мають вбудовані процедури автоматичної перебудови і згладжування звичайно-елементної сітки при виродженні елементів, високоефективні алгоритми рішення контактних задач, широкий набір проблемно-орієнтованих специфікацій матеріалів, можливості користувацького програмування.

Проте, загальним недоліком всіх цих систем є те, що результати досліджень повинні аналізуватись технологом індивідуально. Це означає, що ефективність використання CAE-систем, що використовуються для імітаційного моделювання процесів формоутворення виробів, значною мірою залежить від досвіду проектувальника, правильності вибору ним критеріїв руйнування, обмежень, особливостей формування кінцево-елементної сітки, її градієнтності для визначення діючих та залишкових напружень та деформацій тощо. Тобто, в даному випадку знову повторюється негативна тенденція з

використанням локальних систем конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (див. розд 1.1.), оскільки вищеперелічені CAE-системи безпосередньо не інтегруються в CAD/CAE/CAPP/CAM комплекс. Очевидно, що відсутній ітераційний та рекурентний зв'язок між етапами конструкторсько-технологічного проектування та дослідження процесів формоутворення функціонально-важливих поверхонь виробу. Все це дає підстави стверджувати, що існуючі системи імітаційного моделювання процесів механічного оброблення можуть бути лише базою для створення автоматизованої системи формоутворення виробів (CAF-система – див. рис.1.4). Особливою проблемою ефективності такої системи є створення комплексу програм, що пов'язують результати напружено-деформованого стану виробу в процесі його формоутворення з функцію прогнозування якості його життєвого циклу з врахуванням умов потенційної експлуатації.

1.4. Аналіз сучасних методів прогнозування якості життєвого циклу виробів на етапі технологічної підготовки машинобудівного виробництва

Впровадження функціонально-орієнтованого технологічного проектування базується на багаторівневому проектуванні структури технологічного процесу [204]. Між окремими рівнями діють ітераційні та рекурентні зв'язки, що дозволяє синтезувати і коректувати структуру технологічного процесу на базі принципів комбінованих технологій; макро-, мікро- і нанотехнологій та функціонально-орієнтованих технологій. У цьому випадку, реалізується якісно новий методологічний підхід у проектуванні технологічних процесів, що полягає у формуванні технологічних дій і властивостей виробу залежно від особливостей експлуатації його функціональних елементів. При цьому забезпечується можливість повної адаптації виробу до декларованих конструктором умов його роботи, а також виконання заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу цього виробу в машині або технологічній системі [203, 204]. Таким чином,

зв'язок між функціональними властивостями виробу та технологією їх забезпечення повинен носити прогностичний характер. Очевидно, що експериментальні дослідження у випадку необхідності прийняття оперативного технологічного рішення є вкрай небажаними через значну трудомісткість та відсутність можливості диференційованого аналізу впливу окремих чинників на результат проектування. Наприклад, аналіз впливу геометрії різального інструменту, його коливань у всіх напрямках, деформаційні явища (в т.ч. залишкові) мають суттєвий вплив на мікротопологію поверхні [103, 104, 293, 294]. Проте проаналізувати їх вплив диференційовано можна лише використавши можливості комплексного імітаційного реологічного та аналітичного моделювання, а експериментальним шляхом можна лише підтвердити адекватність їх сукупного впливу на формування мікрогеометрії остаточно [294].

Дослідження впливу структури та параметрів технологічних процесів на якість поверхневого шару та зв'язок їх з експлуатаційними показниками виробів (зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійкості тощо) розглянуті в роботах Албагачієва А.Ю., Без'язичного В.Ф., Бойцова В.Б., Брауна Е.Д., Валєтова В.А., Василькова Д.В., Дальського А.М., Дроздова Ю.М., Запорожця В.В., Ісаєва А.І., Клименка С.А., Корчака С.М., Крагельського І.В., Костецького Б.І., Кузнєцова В.Д., Маталіна А.А., Равської Н.С., Рижова Е.В., Силіна С.С., Старкова В.К., Суслєва А.Г., Чічінадзе А.В., Хрущова М.М., Шнейдера Ю.Г., Ящеріцина П.І. В цих роботах запропоновані різні математичні моделі та критерії, що формалізують процеси руйнування та трансформації металів при експлуатації, механічному та зміцнювальному обробленні. Практично всі висновки щодо зв'язку технологічних та експлуатаційних параметрів базуються на результатах експериментальних досліджень [44, 89, 111, 117, 186, 232, 327]. Розробка методики адекватної оцінки стану поверхневого шару після тієї чи іншої операції механічної обробки на основі імітаційного моделювання процесів формоутворення значно підвищує оперативність прийняття ефективних технологічних рішень, сприяє

всебічному впровадженню інтегрованих CALS-технологій та призводить до суттєвої економії витрат на проведення експериментальних досліджень.

Під якістю поверхні деталей машин розуміють стан її поверхневого шару як результат впливу на нього одного або декількох послідовно застосовуваних технологічних методів формоутворення. Якість характеризується параметрами мікро- та макронерівностей та фізико-механічними властивостями поверхневого шару [293]. Фізико-механічні властивості поверхневого шару характеризується твердістю, структурно-фазовими перетвореннями, величиною, знаком і глибиною поширення залишкових напружень, наклепом, щільністю дислокацій тощо. У свою чергу шорсткість, отримана внаслідок механічного оброблення, згідно ГОСТ 2789-73 визначається лише шістьма параметрами (R_a , R_z , R_{max} , S_i , S_m , t_p) і залежить від геометрії інструмента, умов пружнопластичної деформації оброблюваного матеріалу і вібрацій різального інструменту [294]. На підставі отриманих за допомогою таких малоінформативних критеріїв результатів розвивається гіпотеза про «рівновісну» або «усталену» шорсткість [126, 171, 172, 304]. Вважається, що під впливом сил тертя мікрогеометрія поверхні прагне до деякого стабільного значення, характер якого не залежить від вихідного мікрорельєфу. На підставі цієї гіпотези даються різні практичні рекомендації щодо оптимізації мікрогеометрії поверхонь, які, в більшості випадків, виявляються малопридатними для використання в реальних умовах виробництва [103, 104, 105]. Усвідомлюючи непридатність цих критеріїв для отримання достовірних результатів досліджень для прогнозування їх впливу на функціональні властивості об'єкту виробництва, багато вчених намагалися вирішити проблему синтезом різних комплексних критеріїв, варіюючи в різних комбінаціях все ті ж R_a , R_z або R_q . Очевидно, що результати досліджень зміни характеру мікрогеометрії при терті-ковзанні, що проводилися за допомогою параметричних критеріїв мікронерівностей, не можуть вважатися вичерпними, а повинні бути перевірені за допомогою більш інформативних критеріїв оцінки мікрогеометрії. Необхідно мати можливість повного опису мікротопології

поверхні для вирішення завдання вивчення характеру її зміни під впливом сил тертя. З цією метою і був розроблений міжнародний стандарт ISO4287, що передбачає регламентування 76 параметрів мікронерівностей [19].

Експлуатаційні властивості деталей і вузлів машин, в свою чергу, залежать від режиму експлуатації та якості поверхневого шару. До найбільш поширених експлуатаційних характеристик відносяться: зносостійкість, втомна міцність, триботехнічна якість рухомих спряжень (коефіцієнт тертя), корозійна стійкість, здатність утримання мастильного шару та герметичність [293, 294, 321]. В роботі [300] технологічне спадкування експлуатаційних властивостей в процесах виготовлення деталей запропоновано описувати графом, що відображає коефіцієнти передачі і взаємного впливу фізико-механічних і геометричних параметрів. Для розрахунку коефіцієнтів успадкування за ступенем значущості впливу встановлена послідовність параметрів: твердість (H), відхилення форми (ρ), точність розмірів (I) і шорсткість рельєфу (R) поверхні деталі. Другу похідну від імпульсу енергії, що характеризує величину і положення сили, яка гальмує потік енергії в поверхневому шарі, слід розглядати як технологічний або експлуатаційний бар'єр. Запропоновані методи технологічного управління і контролю спадкуванням експлуатаційних властивостей деталей, що включають:

- вимірювання та моделювання фізико-механічних і геометричних параметрів функціональних поверхонь найбільш відповідальних деталей виробу;
- визначення механізмів технологічного успадкування на основі коефіцієнтів передачі і взаємного впливу найбільш значущих властивостей;
- аналіз технологічних бар'єрів при інтенсивних впливах потоками енергії;
- розробку заходів для технологічного управління процесами оброблення.

Основна ідея механіки руйнування, що теоретично описує процеси різання металів, полягає в наступному [81, 95, 111, 117, 157, 170, 220]. Перехід частини деформованого тіла – заготовки із суцільного стану в частково

зруйнований супроводжується деяким проміжним станом цього тіла, яке обов'язково необхідно враховувати при вирішенні задачі моделювання процесу формоутворення функціональних поверхонь деталей. Найважливішою особливістю областей деформованого твердого тіла, де виникає такий проміжний стан, є те, що в цих областях матеріал заготовки завжди деформований за межею пружності і що саме тут здійснюються найбільш інтенсивні процеси пластичного деформування, вібраційні процеси, явища взаємодії з навколишнім середовищем, мастильно-охолоджувальними рідинами, термодифузійні процеси, та інші явища, що забезпечують в кінцевому випадку локальне руйнування матеріалу. З іншої сторони, саме ці параметри істотно впливають на показники мікро- та макрогеометрії поверхні після оброблення, наявність на поверхні матеріалу залишкових деформацій та дефектного шару тощо [199, 221, 293, 294, 295, 327]. Тобто, аналіз впливу технологічних показників – подачі, швидкості, глибини різання є крайовими умовами задачі дослідження напружено-деформованого та термодинамічного стану заготовки при різанні, що матиме визначальне значення для функціонально-орієнтованого технологічного проектування. Проблемно-орієнтоване узагальнення та акцентовані висновки таких досліджень дозволять створити базу даних для формалізації прогностичної залежності найважливіших експлуатаційних характеристик виробу від структури та параметрів технологічного процесу його виготовлення. В даному сенсі важливою задачею є верифікація змодельованих термодинамічних процесів, що супроводжують формоутворення поверхонь, співставлення відомих положень теорії різання з результатами моделювання для їх подальшого опрацювання

Зношування рухомих поверхонь, зародження втомних тріщин, змінання, корозійне і ерозійне руйнування тощо - це процеси, що протікають на поверхні деталей і в деякому прилеглому до поверхні шарі. Природно, що надання поверхням деталей спеціальних властивостей, сприяє суттєвому підвищенню показників якості машин в цілому і в першу чергу показників надійності. В результаті силової взаємодії на нерухомих спряжених поверхнях в точках

контакту відбувається пружний стик і пластична деформація (зминання) нерівностей, а при взаємному переміщенні поверхонь – зрізання, відламування і пластичний зсув вершин нерівностей, що призводить до інтенсивного початкового зношування трибоконтатів і до збільшення зазорів пар тертя [253]. Підвищеному початковому зношуванню в деяких випадках сприяють виникнення в точках контакту високих миттєвих температур і зрив окисної плівки, що покриває функціонально-важливі поверхні виробу. Це супроводжується молекулярним зчепленням спряжених поверхонь і створенням вузлів схоплювання.

При роботі деталей в легких і середніх умовах експлуатації висота мікронерівностей в період припрацювання рухомих спряжених поверхонь зменшується на 65–75%, що призводить до збільшення фактичної поверхні їх контакту, а отже, до зниження питомого тиску. Графіки зношування (рис. 1.10) показують, що при оптимальній висоті нерівностей (точки O_1 і O_2) початкове зношування металу є найменшим. В більш важких умовах роботи крива 2 зношування зміщується вправо і вгору, а точки оптимальної шорсткості – вправо і вбік збільшення висоти нерівностей [200].

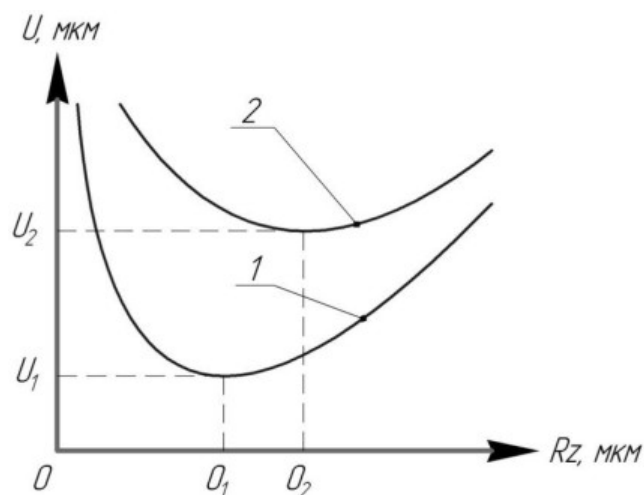


Рис. 1.10. Залежність зношування від висоти нерівностей поверхні

Отже, на експлуатаційні властивості виробів суттєво впливає шорсткість обробленої поверхні, але не у всіх випадках поверхня з низьким параметром мікронерівностей є найбільш зносостійкою, оскільки утримання мастила на поверхні деталей при різних умовах тертя (навантаження, швидкість, матеріал

спряжених деталей тощо) залежить від мікрогеометрії поверхонь [103, 200]. Наприклад, дослідження впливу мікронерівностей після механічного оброблення поверхні хромованого дзеркала гільзи циліндра двигуна внутрішнього згоряння на зношування поршневих кілець показали, що крива залежності зношування поршневого кільця від параметру мікронерівності обробленої гільзи має чітко виражений мінімум. Експериментально встановлено, що найбільша зносостійкість кільця буде в тому випадку, коли якість обробки поверхні дзеркала циліндра відповідає параметру шорсткості $Ra=1,0 \dots 1,25$ мкм, що відповідає забезпеченню мінімального значення несучої здатності масляної плівки [161, 162]. При меншій шорсткості дзеркала циліндра на вершинах гребінців мікронерівностей трибоконтактів створюються підвищений рівень контактного тиску, внаслідок чого масляна плівка інтенсивно руйнується. При оптимальній шорсткості міцність масляної плівки, очевидно, досягає свого максимального значення і це призводить до підвищення опору зношування деталей. Оптимальними є профілі з розвиненою гладкою несучою поверхнею, пересіченою маслоутримуючими заглибленнями, які забезпечують розподіл мастила по поверхні і запобігають прихоплюванням спряжених поверхонь. Сумарну площу накопичувальних кишень роблять рівною 20 - 30% загальної поверхні, глибину доводять до 5-10 мкм. Таким чином, номінальна шорсткість поверхні збільшується в порівнянні з звичайно рекомендованими значеннями (формально з $Ra=0,63$ до $Ra=2,5$ мкм), не зважаючи на те, що несуча здатність поверхні зростає [133].

В сучасних розробках з технології машинобудування формуванню якості поверхневого шару деталі приділяється особлива увага, оскільки цей напрямок відповідає концепції PLM [1, 3, 253]. Важливу роль у забезпеченні заданих експлуатаційних властивостей деталі і її надійності має залишковий напружено-деформований стан функціональних поверхонь виробу, що є результатом термомеханічного впливу на матеріал в ході обробки. При вивченні залишкових напружень та деформацій більшість досліджень показують, що на їх формування переважаючий вплив мають три чинники: 1)

пластична деформація металу поверхневого шару під дією сил різання; 2) пружнопластичні деформації внаслідок нерівномірного теплового розширення металу в поверхневому шарі; 3) структурно-фазові зміни в матеріалі при його термопластичному деформуванні [291, 299]. Методика експериментально-аналітичного визначення залишкових напружень, обумовлених одночасно температурним і силовим чинниками в поверхневому шарі деталей, була запропонована в роботах В.Ф.Без'язичного [89, 295]. Питання теоретичного розрахунку залишкових напружень від структурно-фазових перетворень в ході механічної оброблення висвітлена у роботах А. М. Суліми, А. В. Подзея, А.Г.Суслова, А.Рамеша, С.Хана та ін. [26, 51, 89, 291, 299, 259, 293, 295].

Встановлено [291, 299], що створення в поверхневому шарі наклепу і залишкових напружень стиску в більшості випадків підвищує втомну міцність і зносостійкість, але одночасно в 1,5-2 рази зменшує корозійну стійкість деталей. Остання обставина пояснюється тим, що первинна захисна плівка на надмірно деформованому поверхневому шарі деталі легше руйнується під впливом внутрішніх напружень, що прискорює процес корозії. Залежно від характеру наклепу і шорсткості поверхні деталі межа втоми у наклепаних зразків завдяки дії стискаючих напружень підвищується на 30-80%, а зносостійкість спряжених рухомих поверхонь - в 2-3 рази. Під дією розтягувальних напружень межа втоми для високолегованих сталей підвищеної твердості зменшується на 30% і на 15-20% зменшується зносостійкість функціональної поверхні деталі [293].

При домінуючому впливі силового чинника в поверхневому шарі утворюються напруження стиску, рівень і глибина залягання яких із збільшенням глибини і ступеня наклепу зростають (рис.1.11) [76, 236]. Проте, це явище є найбільш характерним для чорнових методів оброблення.

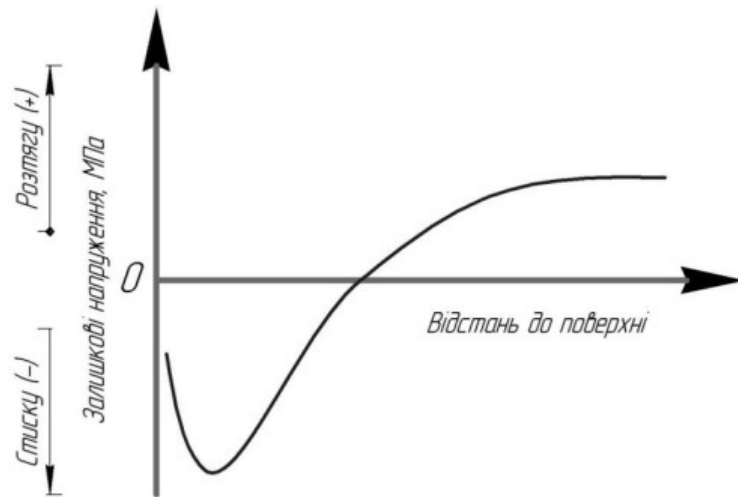


Рис. 1.11. Характерна епюра залишкових напружень у поверхневому шарі

При напівчистовому та фінішному обробленні, навпаки, починає помітно проявлятися вплив теплового чиннику і інтерферентні залишкові напруження під поверхнею можуть змінювати знак, стаючи розтягувальними [200]. При чорновому та чистовому обробленні сталевих заготовок пластична деформація поширюється на глибину від 50 до 300 мкм; при обдирочному обробленні - до 1000 мкм.

Відомо, що руйнування деталей при експлуатації, як правило, починається з поверхні, де зовнішній шар виявляється найбільш навантаженим або підлягає активному шкідливому впливу зовнішнього середовища [230]. Зі збільшенням глибини і ступеня наклепу підвищуються зносостійкість і втомна міцність деталей машин, що працюють при нормальній температурі. Проте для деталей з жароміцних сталей і сплавів (ХН70ВМТЮФ, ХН40МДТЮ, ХН58КТВЮ), наприклад, лопаток газових турбін, що працюють при високих температурах (вище 800°C), наклеп виявляється шкідливим, оскільки він знижує втомну міцність та зносостійкість цих виробів. Проте, по іншому проявляється вплив залишкових напружень у деталях, що функціонують в умовах циклічного знакозмінного навантаження при нормальній температурі. У цьому випадку за наявності в поверхневому шарі деталі залишкових напружень стиску межа її витривалості збільшується, тоді як напруження розтягу суттєво знижує опір втоми [230]. Нарешті, висота мікронерівностей, напрямок штрихів

обробки, форма і крок нерівностей, розміри опорної поверхні, тобто параметри, що визначають мікрорельєф обробленої поверхні, суттєво впливають на експлуатаційні властивості деталей машин і приладів [321].

Узагальнюючи вищенаведені результати, можна дійти висновку, що практично усі дослідження впливу технології оброблення виробів на експлуатаційні властивості деталей машин базуються на результатах експериментальних досліджень. Єдиної методики формальної інтерпретації досліджень параметрів фізико-механічного та мікрогеометричного стану поверхневого шару на сьогоднішній день досі немає. Беззаперечним є те, що експериментальні дослідження займають багато часу і не можуть реально впливати на прийняття оперативних конструкторсько-технологічних рішень, що вимагає реалізація концепції PLM. Крім того, декларовані діючим в Україні ГОСТ 2789-73 параметри мікронерівності є недостатньо інформативними для встановлення впливу технологічних показників на окремі експлуатаційні властивості деталей машин. Тому очевидним є актуальність розроблення адекватних методів моделювання як мікрогеометричних, так і напружено-деформаційних параметрів оброблення деталей з наступним аналізом у спеціалізованій CAE-системі їх впливу на функціональні властивості окремих поверхонь та виробу в цілому в умовах його потенційної експлуатації.

В результаті імітаційного моделювання реологічного стану заготовки при різанні можуть бути встановлені закономірності зміни напружено-деформованого стану зони різання і питомої роботи стружкоутворення, інваріантні в широких інтервалах зміни умов та режимів оброблення, що є основою формалізованого опису механіки процесу різання металів з ізоморфними механічними властивостями [174, 175, 270, 271, 273, 274, 282]. Отримані аналітичні залежності та практичні рекомендації можуть слугувати теоретичним апаратом для кількісного аналізу внутрішніх взаємозв'язків і чинників, що визначають ефективність відповідного методу оброблення як засіб підвищення оброблюваності матеріалів різанням, а також можуть знайти застосування при створенні нових методів формоутворення, що

використовують додаткові види механічної чи термічної дії на матеріал заготовки. Результати імітаційного реологічного моделювання забезпечать розрахунок таких важливих чинників напружено-деформованого стану обробленої поверхні, як залишкові напруження I і II роду, мікротопологія поверхневого шару, наклеп тощо. Ці показники є вкрай важливими складовими загальної моделі функціонально-орієнтованого технологічного проектування структури та параметрів технологічного процесу, що базується на концепції паралельного інжинірингу PLM-системи.

Таким чином, виходячи з необхідності побудови функціонально-орієнтованих технологій, можна зробити висновок, що модернізації повинні підлягати не лише система автоматизованої технологічної підготовки виробництва, але і система інженерного моделювання – CAE-система. На сьогоднішній час система інженерного моделювання функціонує таким чином (рис.1.1): з 3D моделі виробу, специфікації матеріалу і схеми силової взаємодії і кінематичних обмежень ми отримуємо тільки об'ємні хромографічні і аналітичні картини еквівалентних напружень, макродеформацій і термодинамічного стану виробу в процесі його експлуатаційних навантажень [275, 278, 280, 287, 288, 290]. Класичні CAE-системи інженерного аналізу є, по суті, системами MacroCAE (*Macro Computer Aided Engineering*), що дозволяють за допомогою розрахункових методів симуляції макрофізичних процесів оцінити, як поведеться комп'ютерна модель виробу у імітованих умовах експлуатації, адекватних реальним. Ці CAE системи не розраховані на дослідження триботехнічних, мікро- та нано-деформаційних процесів, таких як аналіз зносостійкості, контактної жорсткості, втомної міцності, корозійної стійкості окремих поверхонь виробу тощо [270, 271, 273, 274, 282]. Теоретична база цих досліджень достатньо вивчена та алгоритмізована, але потреби у розробленні таких систем інженерного аналізу, як MicroCAE та NanoCAE в інженерній практиці ще не було, оскільки запропонований підхід до формування функціонально-орієнтованих технологій поданий вперше.

Проте, не менш важливою є робота не реалізованої ще підсистеми мікроінженерного моделювання, результатом якої є моделювання динаміки руйнування і кінетики зношування найбільш важливих функціональних поверхонь виробу, модель втомних навантажень, модель забезпечення несучої здатності мастильного шару, модель корозійної стійкості тощо (рис.1.12) [275, 278, 280, 287, 288, 290]. Розрахунок ресурсу трибосопряжень дозволяє прогнозувати кінетику зміни структури трибомеханічної системи. Це є необхідним елементом сучасного підходу до проектування і виготовлення механічного устаткування гарантованої і рівної довговічності [121, 325]. Тому для реалізації концепції функціонально-орієнтованого проектування виникає необхідність суттєвого вдосконалення існуючої CAE системи (доповнення *MacroCAE* підсистемами *MicroCAE* та *NanoCAE*).

Надалі слід також реалізувати підсистему наноінженерного моделювання.

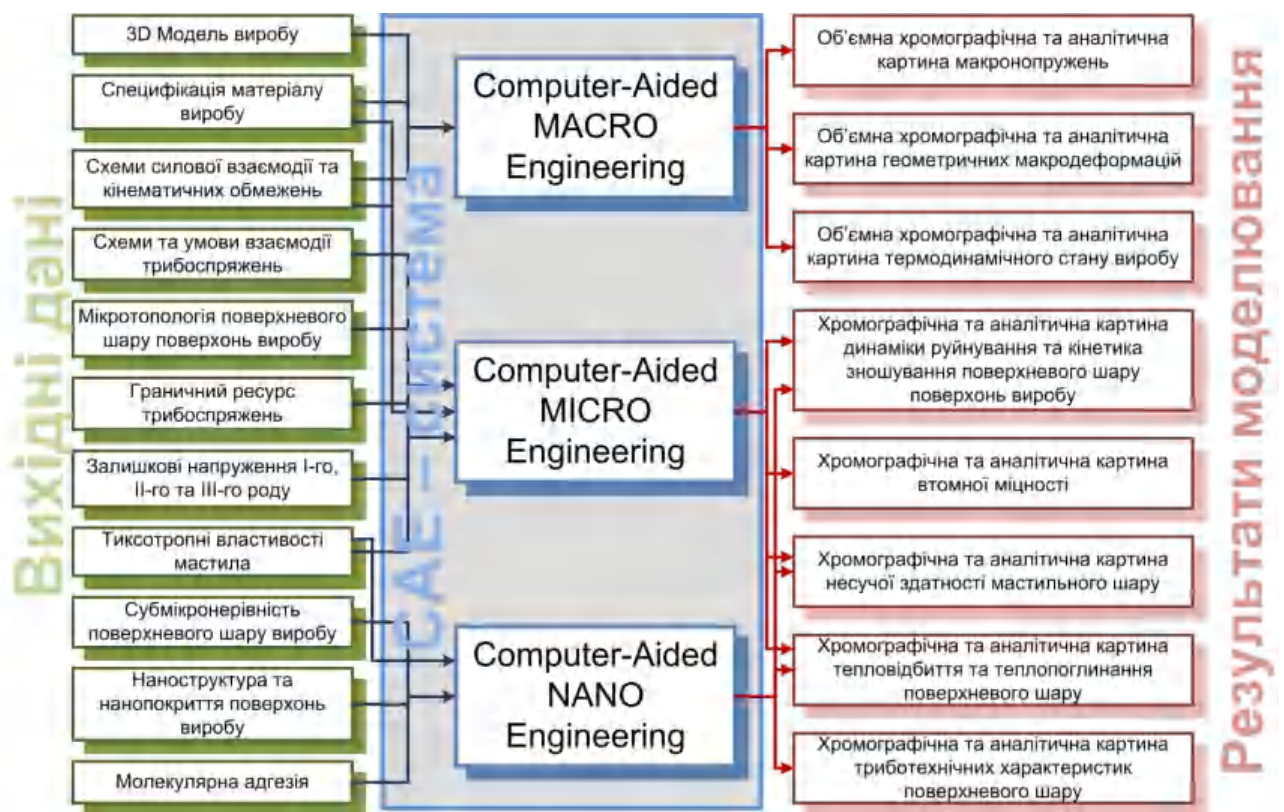


Рис.1.12. Схема модернізованої CAE-системи інженерного моделювання

1.5. Мета і основні завдання дисертаційної роботи

Метою дисертаційної роботи є розроблення науково-прикладних засад забезпечення комплексних показників експлуатаційної якості деталей машин на основі впровадження методології функціонально-орієнтованого проектування технологій механічного оброблення машинобудівних виробів. Виявлення та моделювання рекурентних зв'язків між структурно-параметричними результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробів дасть змогу забезпечити оптимальний комплекс їх кваліметричних показників засобами паралельного інжинірингу.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі задачі:

– Провести аналіз сучасного стану технологічного забезпечення інтегрованих систем автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва та розробки методів прогнозуючого моделювання процесів механічного оброблення виробів.

– Розробити методичне та алгоритмічне забезпечення автоматизованої технологічної підсистеми формоутворення деталей, в основі якої лежить проблемно-орієнтований аналіз імітаційної реологічної моделі окремих технологічних переходів та комплекс аналітично-прикладних програм формування параметрів точності, деформаційних, термодинамічних, мікрогеометричних, структурних та фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

– Створити методики імітаційного моделювання мікрогеометричних та залишкових напружено-деформаційних параметрів механічного оброблення деталей з наступним аналізом їх впливу на функціональні властивості окремих поверхонь та виробу в цілому в умовах його потенційної експлуатації.

– Засобами математичного моделювання забезпечити формалізацію зв'язків між структурою технологічного процесу і його параметрами та домінуючими експлуатаційними властивостями деталей.

– Розробити методику структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу та алгоритм розрахунку інтегрального кваліметричного показника, який системно характеризує функціональні властивості навантажених поверхонь виробу.

– Провести експериментальну апробацію та навести узагальнюючий приклад реалізації запропонованої теорії функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів механічного оброблення виробів машинобудування.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДОЛОГІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

2.1. Структура та особливості використання автоматизованої технологічної системи формоутворення (CAF-системи), як основи синтезу функціонально-орієнтованих технологій

Особливістю впровадження функціонально-орієнтованих технологій для ефективної реалізації методології PLM в машинобудуванні на основі принципу паралельного проектування є використання CAF-системи (*Computer Aided Forming*) [60, 61, 62, 63, 280, 281, 284, 286]. У основі цієї системи покладений аналіз реологічної імітаційної моделі окремих технологічних переходів і комплекс функціональних модулів і аналітичних додатків формування точнісних, термодформаційних, мікрогеометричних і структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь. Наповнення репозиторія даних шляхом вдосконалення цифрового макету виробу відбувається вже на стадії технологічної підготовки виробництва, а не в результаті проведення трудомістких експериментальних досліджень.

Для врахування особливостей експлуатації окремих деталей в машині або технологічній системі і забезпечення заданого, необхідного або граничного їх експлуатаційного потенціалу, необхідно реалізувати алгоритм прийняття рішень щодо вибору структури та параметрів технологічного процесу, виходячи з предиктивних можливостей CAF-системи [61, 62, 63, 65, 280, 284, 286]. Результатом роботи цієї системи є комплекс напружено-деформаційних, силових та термодинамічних параметрів різання, динаміка зміни кута зсуву та картина фазових перетворень на обробленій поверхні матеріалу. Все це дає змогу здійснити прогнозування таких важливих експлуатаційних параметрів, як

мікротопологія обробленої поверхні, залишкові напруження 1 і 2 роду, фізико-хімічний стан поверхневого шару тощо [270, 274, 276, 281, 287].

Узагальнений алгоритм синтезу технологій, що базується на ітераційних і рекурентних зв'язках, пов'язаний з функціонуванням САФ-системи в структурі CAD/CAPP/CAM, наведений на Рис.2.1 [278, 280, 281]. Процес проектування цих технологій базується на наступних етапах:

- формування цифрового макету виробу;
- формалізація та моделювання умов забезпечення ефективного функціонування виробів;
- імітаційне реологічне моделювання напружено-деформованого, термодинамічного та структурно-фазового стану найбільш відповідальних поверхонь деталі в процесі їх формоутворення;
- імітаційне прогнозування функціонально-орієнтованих властивостей виробу;
- пресинтез структури та параметрів технологічного процесу і технологічного забезпечення об'єктно-орієнтованої технології;
- коректування і синтез структури технології на базі принципів функціонально-орієнтованих технологій;
- забезпечення заданих, необхідних або граничних властивостей виробу в залежності від потенційних умов та особливостей його експлуатації в машині або технологічній системі.

Функціональність та системний взаємозв'язок автоматизованої технологічної системи формоутворення (САФ-системи) з іншими системами інтегрованої конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва на основі концепції функціонально-орієнтованого проектування операцій показано на Рис.2.2.



Рис.2.1. Структурно-логічна схема технологічної підготовки виробництва за функціонально-орієнтованим принципом

Для повноцінного функціонування САФ-системи, основаної на результатах імітаційного реологічного моделювання технологічних переходів механічного оброблення деталей, необхідно сформувати базу даних та базу знань, що включають в себе [278, 280]:

- формалізовану проблемно-орієнтовану інформацію щодо фізико-механічні характеристик оброблюваного та інструментального матеріалу (механічні та термодифузійні характеристики, криві термодинамічного зміцнення матеріалів, їх структурно-фазовий стан до оброблення тощо);
- алгоритм вибору та методики розрахунку критерію руйнування;
- модель текучості матеріалу;
- метод ітераційного обчислення (Ньютона-Рафсена чи прямий ітераційний метод) та відповідний вирішувач (Skyline чи метод розріджених матриць) задач, сформованих за допомогою методу скінчених елементів 9(MSE);
- метод розрахунку похибки збіжності результатів;
- метод вибору та особливості генерування лагранжевої або ейлерової сітки для MSE аналізу;
- моделі наростування та зношування інструменту.

Вхідними даними для розрахунку є: альтернативні варіанти структури та параметрів технологічних переходів; матеріал оброблюваної деталі, її геометричні характеристики; термодинамічний та структурно-фазовий стан поверхонь до оброблення; геометричні характеристики різального інструменту; матеріал різальної частини інструменту, його покриття; модель зношування різального леза. Крім того, для отримання якісних та адекватних результатів досліджень необхідно попередньо декларувати тип задачі: отримання картини напружено-деформованого стану поверхонь в процесі формоутворення або моделювання залишкових напружень та деформацій.

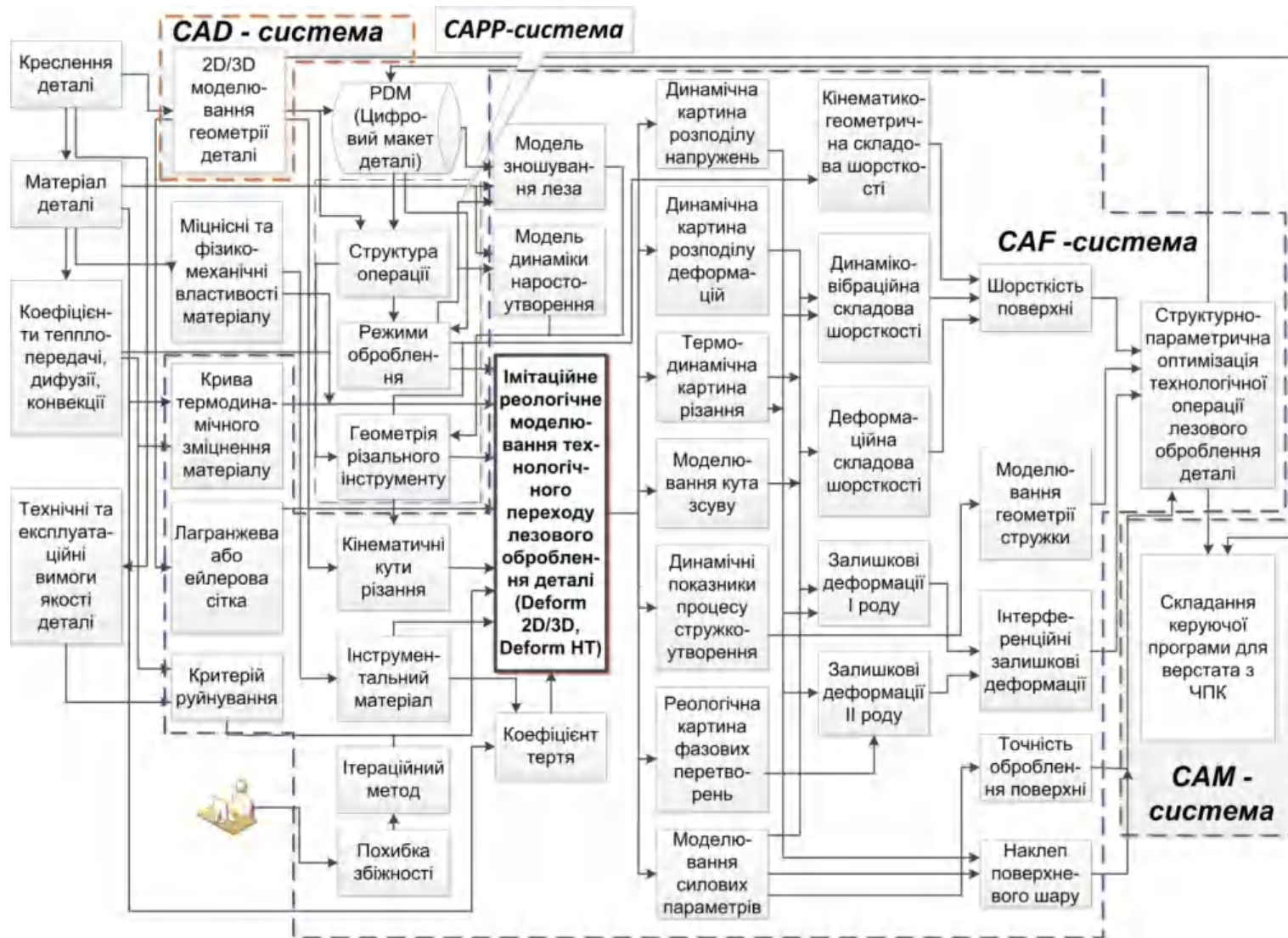


Рис.2.2. Узагальнений алгоритм функціонування CAF-системи у структурі інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва (CAD/CAPP/CAM)

В кожній з зазначених задач специфічно вибирається тип сітки та її градієнтність, ця сітка прив'язується до інструменту чи до заготовки. Методики вирішення таких типів задач будуть розглянуті в наступних розділах даної дисертаційної роботи.

В результаті 2D або 3D моделювання реологічних процесів формоутворення виробу, спочатку отримуються динамічні картини розподілу напружень, деформацій, термодинамічна картина процесу різання, динаміка зміни кута зсуву, змодельовані силові показники та побудована реологічна картина структурно-фазових перетворень. Все це дасть змогу на основі алгоритмів та системних підпрограм встановити геометрико-кінематичну, вібраційно-динамічну та деформаційну складову мікротопології поверхні; залишкові напруження I-го та II-го роду та залишкові деформації обробленої поверхні. Структурно-параметрична оптимізація функціонально-орієнтованого технологічного процесу базується на основі розрахунку узагальненого кваліметричного параметру [287, 288], що системно відображає експлуатаційні параметри поверхні (зносостійкість, втомна міцність, мастилоутримуючі властивості тощо) з врахуванням змодельованих в САF-системі показників мікротопології поверхні та залишкових напружень та деформацій .

Таким чином, базова методологія побудови функціонально-орієнтованого технологічного процесу передбачає вирішення ряду проблем, пов'язаних з адекватним імітаційним моделюванням напружено-деформованого стану деталей в процесі їх формоутворення:

а) формалізацією процесів кінетики дислокацій методом скінчених елементів та визначення векторної характеристики руху дислокацій;

б) використання в САF-системі формалізованого опису кривих зміцнення та розм'якшення оброблюваного матеріалу, що визначають вплив напружень, швидкості деформації та температури на опір деформації в просторі та часі;

в) методику вибору типу та градієнтності рухомої сітки а також забезпечення умов її невиродженості;

г) вибір моделі текучості матеріалу та критерію його руйнування в процесі формоутворення;

В подальшому у відповідності до узагальненого алгоритму функціонування САФ-системи (Рис.2.2) [287] результати напружено-деформованого стану поверхонь в процесі їх формоутворення [64, 274, 275, 279] дозволять здійснити моделювання мікротопології поверхонь [70, 276, 285], залишкових напружень та деформацій [277, 289], а відтак – формалізувати прогностичні зв'язки між структурою та параметрами технологічного процесу оброблення деталей та домінуючими експлуатаційними властивостями деталей (забезпечення зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійкості, триботехнічної якості рухомих спряжень тощо) [272, 281, 283] (Рис.2.3).

2.2. Методика комп'ютерно-імітаційного (реологічного) моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану матеріалу заготовки в зоні різання на основі теорії скінчених елементів.

Метод скінчених елементів (МСЕ) [174, 175, 185, 271, 274] є одним з основних методів розрахунку напружено-деформованого стану окремих поверхонь деталей в процесі їх формоутворення. Основною відмінністю цього методу є можливість вирішення складних нелінійних завдань пластичного деформування, тоді як аналітичні рішення можуть бути отримані тільки для випадків пружного деформування конструкцій під дією зовнішніх навантажень.

Для правильного і ефективного застосування програмного забезпечення, що реалізують МСЕ-аналіз для імітаційного моделювання процесів пластичного деформування та руйнування, потрібна чітка формалізація математичних основ методу і пов'язаних з ними обмежень і джерел помилок (похибок) проектних рішень.

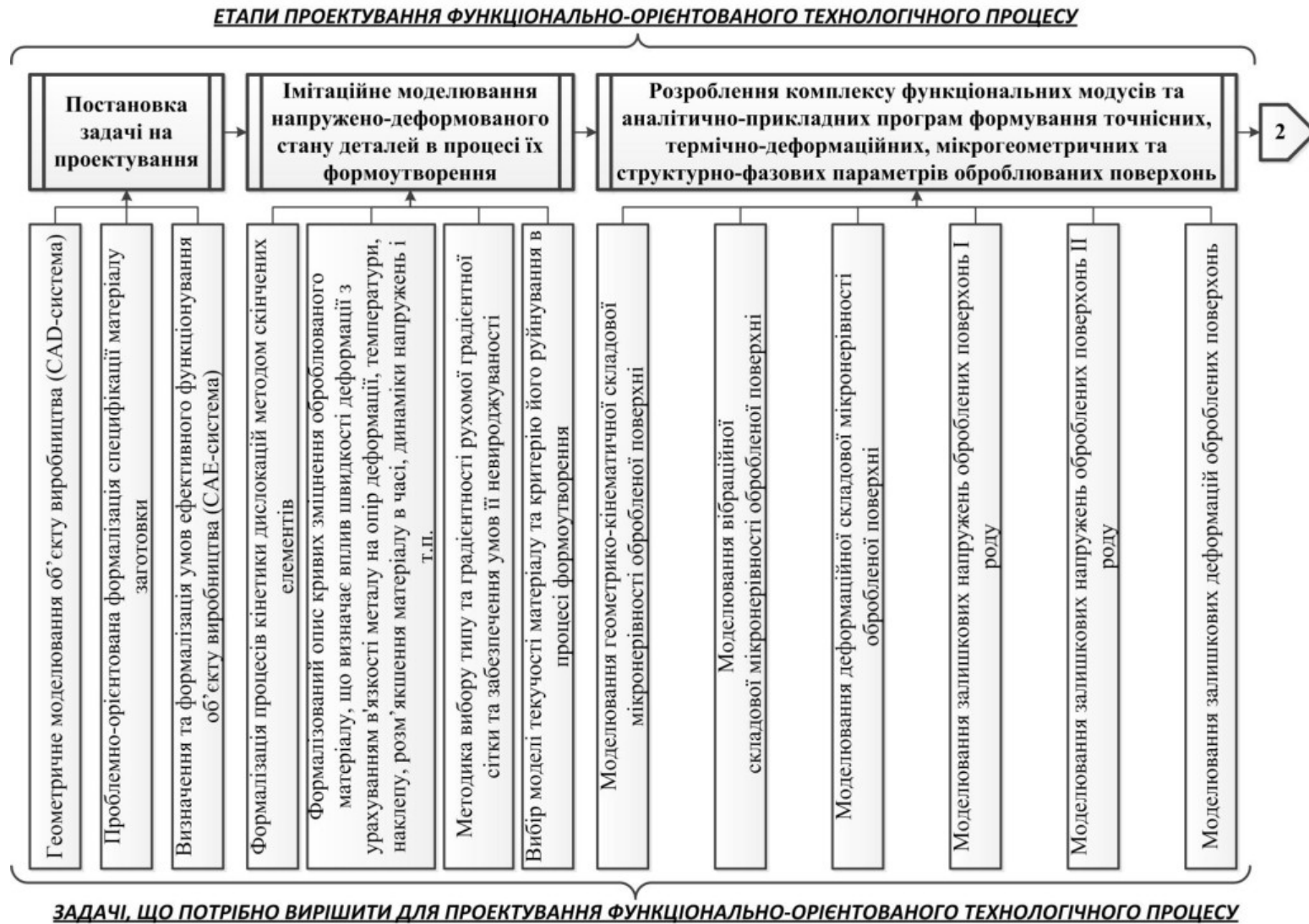


Рис.2.3. Послідовність побудови функціонально-орієнтованого технологічного процесу та структура задач, які при цьому потрібно вирішити

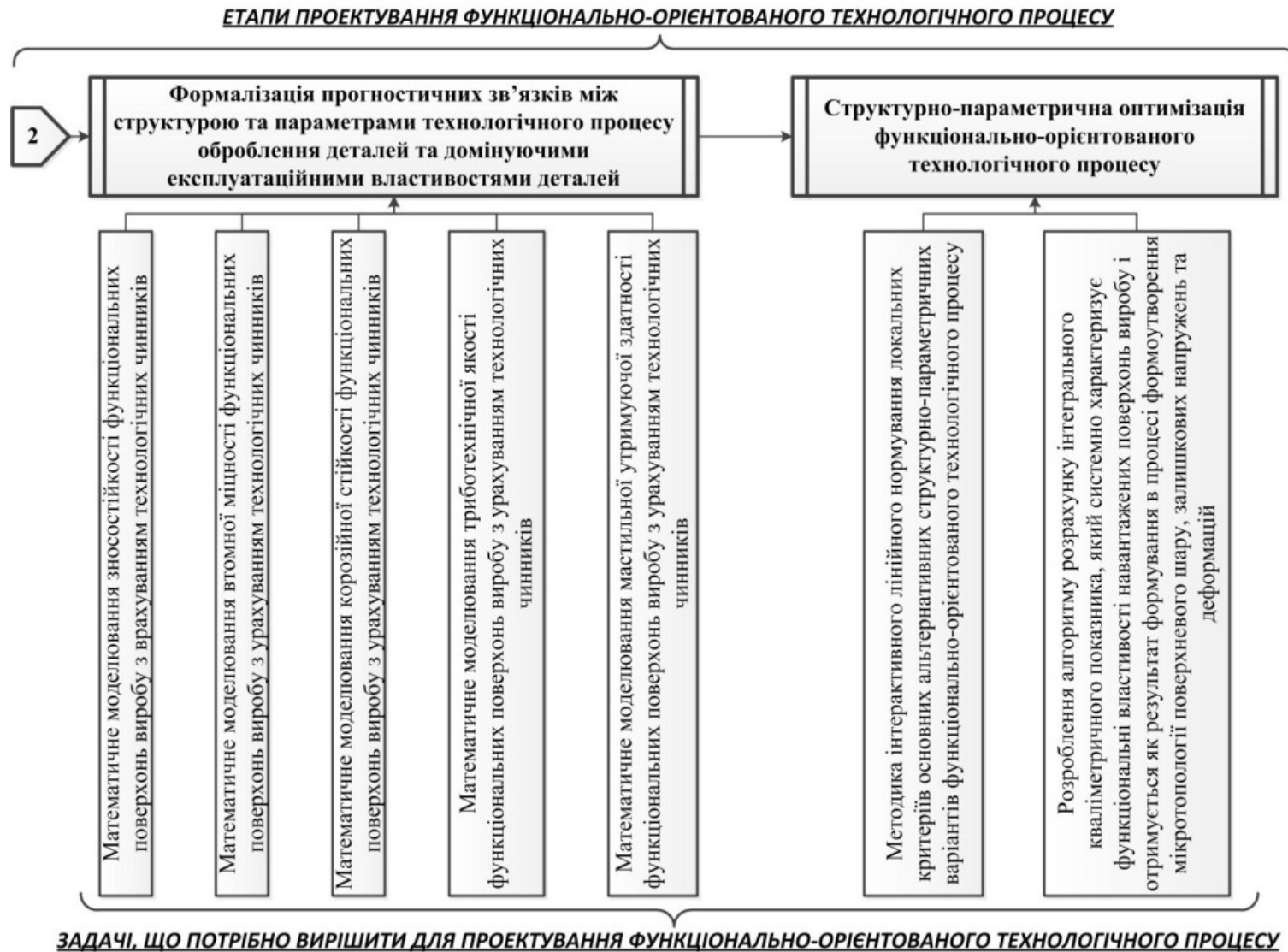


Рис.2.3. (Продовження)

2.2.1. Механіка дислокацій при різанні та моделювання процесів руйнування та пластичного деформування виробів методами скінчених елементів

Теорія пластичної деформації використовує більш складно-формалізований математичний апарат, ніж теорія пружності або термодинаміка через свою нелінійність, проблематичність опису динамічних процесів, що відбуваються у пластично-деформованому середовищі під дією локального руйнівного напруження, впливу великої кількості чинників на отримання адекватного результату моделювання. Пластична деформація, що передуює руйнуванню, визначається рухом дислокацій в зоні пластичних деформацій (для процесів різання – в зоні стружкоутворення). Сучасній науці досі не вдалося знайти універсальний аналітичний опис дії сил, необхідних для деформаційних дислокацій. Найбільш ефективним методом наукових досліджень в цьому напрямку є розповсюдження механіки суцільних середовищ на області майже атомних розмірів і її корекція шляхом введення відповідної нелінійної поправки для області найбільш високих деформацій в ядрі дислокації замість квантово-механічного аналізу [22, 43, 108, 190]. Проте отримання квантово-механічного рішення навіть для одиначної дислокації не є так вже складно, оскільки велика частина енергії дислокації зосереджена не в ядрі цієї недосконалості, а в пружно-деформованій області, розміри якої дозволяють з впевненістю використати континуальну теорію пружності [27, 79, 128, 157, 235, 248, 163].

На макроскопічному рівні механіка руйнування (різання) використовує рівняння зсуву, що пов'язують напруження і деформацію (ці рівняння або отримані емпірично, або витікають з даних про структуру матеріалу [263]), і, враховуючи умови рівноваги і геометричної єдності, передбачає поведінку областей матеріалу, розміри яких настільки великі, що можна вважати їх однорідними. Теорія пружної деформації досить добре вивчена і успішно застосовується в самих різних випадках інженерної практики, зокрема у

відомих САЕ-системах. Набагато складніша задача, що пов'язана з пластичною деформацією, що є основною проблемою формоутворення деталей в процесах механічного оброблення, оскільки вона супроводжується зміною структури та фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Навіть якщо нехтувати цим і використати аналітичні залежності, що досить точно описують зв'язок деформації і напруження, виходить система рівнянь, яку можна вирішити лише для порівняно простих випадків. Якщо говорити про деформацію зсуву, найбільш характерну в традиційних процесах різання, то змінами структури нехтувати не можна, оскільки вони залежать від динаміки випереджуючих деформацій та поточних значень напруження і температури в зоні формоутворення оброблюваних поверхонь [66].

Залежність величини напруження у пластично-деформованому виробі, при термодинамічному лінійному напруженому стані, від величини деформації формалізують криві зміцнення [194]. Оскільки напруження, що викликають пластичну деформацію, залежать від багатьох чинників, у тому числі від температурно-швидкісних умов деформації, то криві зміцнення для кожного металу і сплаву слід встановлювати стосовно конкретних температурно-швидкісних умов деформації. Деформації, що змінюються залежно від величини і швидкості зміни напруження, що викликають пластичну деформацію при лінійному напруженому стані для даних температурних швидкісних умовах деформації є напруженням текучості - σ_s . Для аналітичного визначення σ_s необхідно створити такі умови деформації, які розподілені по частині заготовки, що деформується, при яких напружений стан залишився би лінійний. При випробуванні на осідання в межах пластичних деформацій немає обмеження по величинах деформацій, при яких можуть бути визначені значення напруження текучості σ_t , проте необхідно виключити вплив контактного тертя, що представляє досить складне завдання [114].

Сила різання R в зоні стружкоутворення в будь-який момент деформування визначається з залежності :

$$R = \sigma_s \cdot A \quad (2.1)$$

де A - дійсна площа поперечного січення стружки в даний момент деформування.

Деференціюючи вираз (2.1), отримаємо:

$$dR = \sigma_s \cdot dA + A \cdot d\sigma_s \quad (2.2)$$

Опір металів деформації описується рівнянням виду [210]:

$$d\sigma_s = \frac{\partial \sigma_T}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma_T}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial \sigma_T}{\partial \dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} \quad (2.3)$$

де σ_T - межа текучості;

T - температура в зоні стружкоутворення;

ε - відносна деформація;

τ - час деформації;

$\dot{\varepsilon}$ - швидкість зміни деформації.

Складові рівняння (2.3) враховують вплив на опір деформації температури, наклепу, розм'якшення матеріалу в часі, зміни напружень залежно від швидкості деформації з урахуванням в'язкості металу. До теперішнього часу загальні закономірності, необхідні для вирішення рівняння, недостатньо вивчені. Тому на практиці для визначення опору деформації σ_s використовують експериментальні дані у вигляді конкретних дискретних значень для певних умов дії на оброблюваний матеріал або залежності, що апроксимують експериментальні дані [114].

Серед найбільш розповсюджених законів стану матеріалу при великих деформаціях найбільш поширений еластотеплов'язкопластичний закон Джонсона-Кука [174]. Він враховує адіабатичні зсувні явища, викликані великими пластичними деформаціями і значними градієнтами температур. Цей закон встановлює залежність напруження σ_s від величини відносного зсуву ε (%) і швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$, а також від температури T , і може бути розкладений в мультиплікативній формі на три множники:

$$\sigma_s = (\sigma_{T_0} + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C_1 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left[\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right]^m\right) \quad (2.4)$$

σ_{T_0} – межа текучості матеріалу при кімнатній температурі;

T_f – температура плавлення металу;

B – коефіцієнт чутливості до деформації;

C_1 – коефіцієнт чутливості до інтенсивності деформації;

n – параметр, що відповідає за деформаційне зміцнення;

m – параметр, що характеризує температурний відпуск.

Таким чином, перший множник описує явище наклепу, другий - динамічні процеси, третій - явища відпуску. Множник, пов'язаний з наклепом, відповідає напруженню протікання постійної інтенсивності деформації. Другий множник - мультиплікативний чинник, що характеризується динамікою зміцнення матеріалу. Він залежить від еквівалентної швидкості пластичної деформації. Третій множник - чинник що відповідає явищу теплового відпуску.

На Рис.2.4 та зображені графічні залежності напруження текучості від температурних та деформаційних показників, для хромонікелевого сплаву ХН60Т (аналог IN718) та сталі 3Х2В8Ф (аналог 316L) для рівняння Джонсона-Кука, що задаються базою даних системи Deform 2D (Рис.2.5).

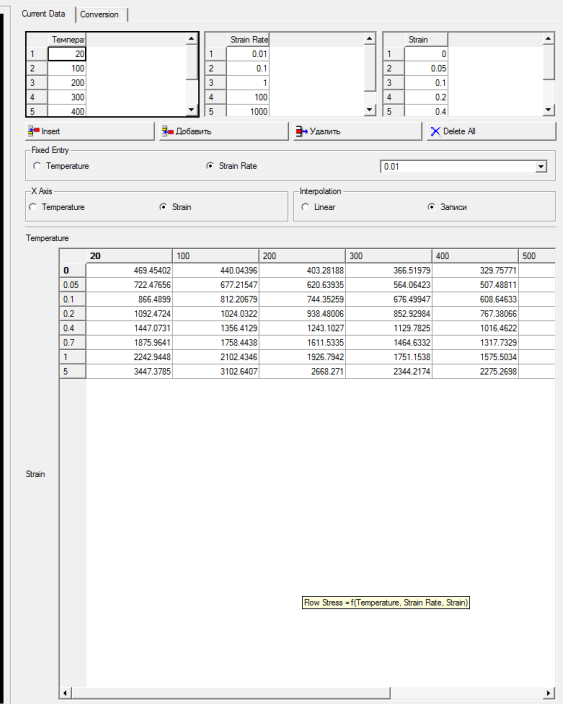
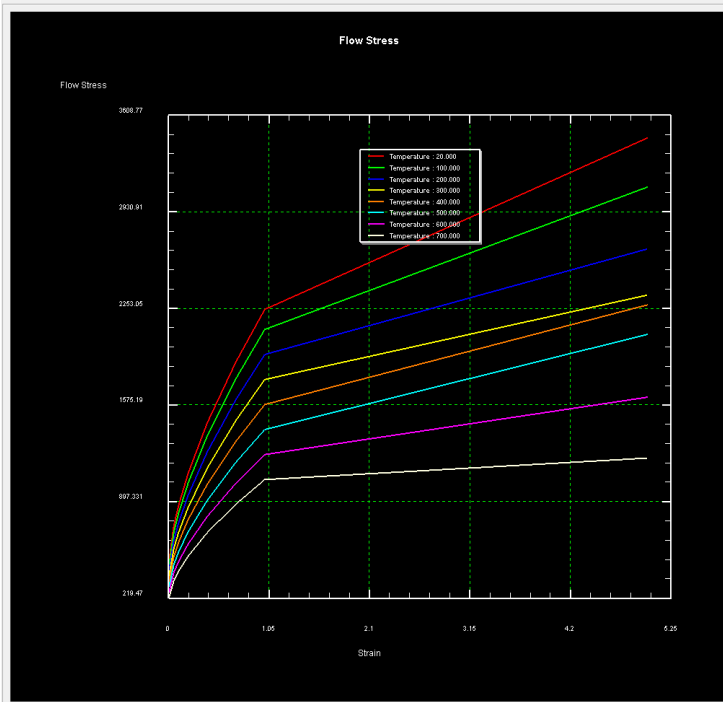
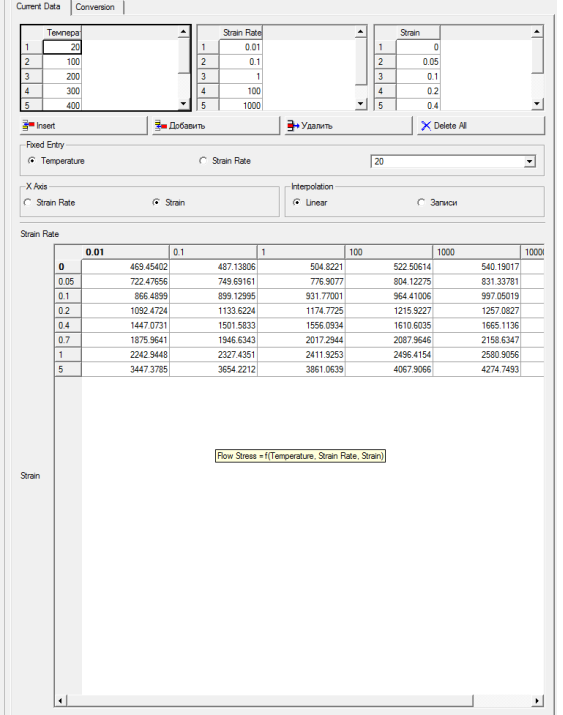
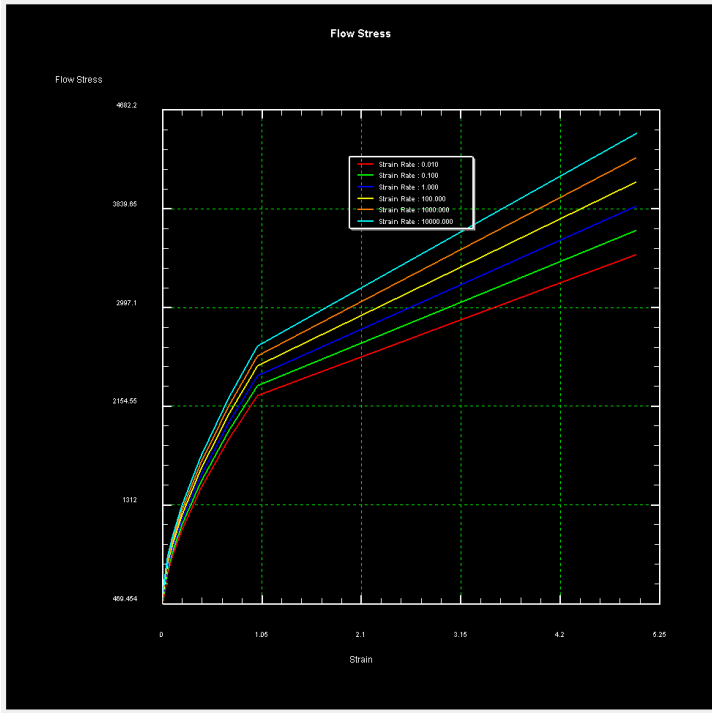


Рис.2.4. Графічні та аналітичні залежності напруження текучості від температурних та деформаційних показників хромонікелевого сплаву ХН60Т (аналог IN718) в базі даних системи Deform 2D

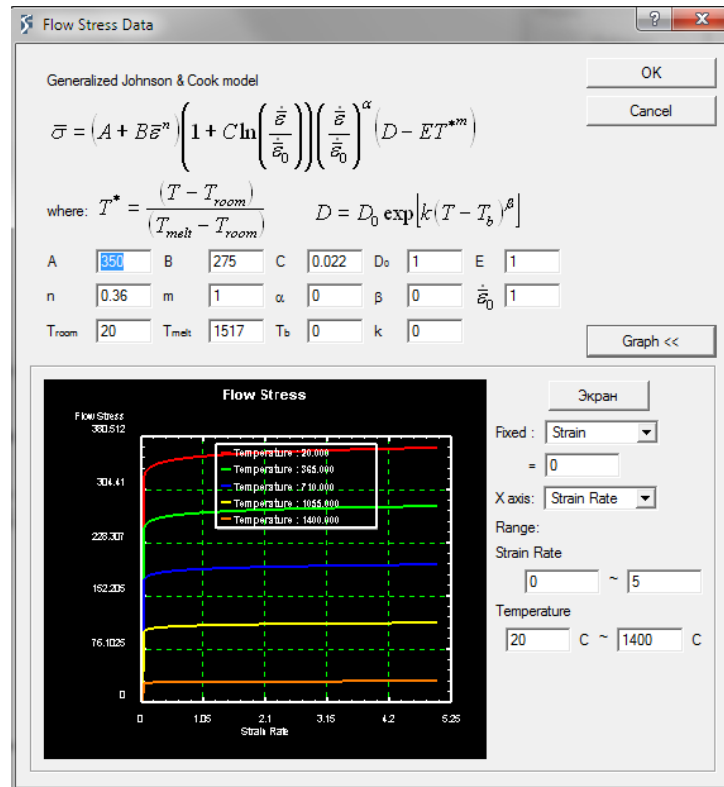


Рис.2.5. Графічні та аналітичні залежності напруження текучості σ_s від температурних та деформаційних показників сталі 3X2B8Ф (аналог 316L) для рівняння Джонсона-Кука в базі даних системи Deform 2D

Як відомо [27, 128, 157, 163, 190], пружність є результатом статичного опору міжатомних зв'язків, що викликається зміщенням атомів; під час деформації зв'язку не порушуються і робота деформації переходить або в потенційну енергію, або у вільну енергію при пониженні ентропії. Термічна активація не грає ролі, і деформація не залежить від часу. При пластичній деформації атомні зв'язки руйнуються, а потім частково відновлюються. При температурах нижче тих, що необхідні для розриву зв'язків під дією високотемпературних теплових явищ, в кристалічних матеріалах деталей відбувається перебудова структури за рахунок теплових флуктуацій. Деформація здійснюється шляхом зародження і руху дислокацій в основному під дією прикладеного дотичного напруження. Енергія стійкої дислокаційної конфігурації настільки висока, що вона не може бути отримана за рахунок теплових флуктуацій, тому термічна активація має лише незначний вплив на

пластичність кристалічної структури оброблюваного матеріалу [190]. Деформація створює структурні неоднорідності (смуги ковзання) на обробленій поверхні, що і призводить до анізотропії матеріалу (утворенню його текстури). Якщо зсувна дислокація проходить відстань x по площині зсуву довжиною 1, висотою h і шириною t , то виникає пластична деформація зсуву [102, 111, 248]:

$$\tau = \frac{xt}{tl} \cdot \frac{b}{h} \quad (2.5)$$

Якщо в оброблюваній деталі є N дислокацій, паралельних напрямку подачі S , і усі вони проходять в середньому відстань λ , то повна деформація становитиме:

$$\tau = \frac{\lambda b}{lh} \cdot N = \Lambda \cdot \lambda \cdot b \quad (2.6)$$

де $\Lambda = N/lh$ - густина дислокацій.

Оскільки дислокація створює в кристалічній структурі деталі самоврівноважувальне поле напружень, можна знехтувати анізотропією кристалічної ґратки найбільш розповсюджених у машинобудуванні матеріалів і рахувати зону стружкоутворення деталі лінійно-пружною. Тоді можна визначити поля напруження крайовою і гвинтовою дислокацією шляхом суперпозиції цих полів і будь-якої дислокації змішаного типу.

Для пояснення природи руху дислокацій під час процесу різання, розглянемо тензор механічних напружень. Якщо окіл будь-якої точки зони стружкоутворення обмежити шістьма взаємно перпендикулярними площинами і отриманий елементарний паралелепіпед зорієнтувати ребрами паралельно осям декартових координат, то на кожній із граней паралелепіпеда будуть діяти відповідні напруження. Повні напруження у площинах xu , xz та uz можна розкласти по напрямках, паралельних до осей декартових координат. Отримані дев'ять компонентів напружень повністю визначають напружений стан і утворюють тензор механічних напружень (тензор напружень Коші) [43]:

$$\sigma = \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \Gamma^{(e_1)} \\ \Gamma^{(e_2)} \\ \Gamma^{(e_3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

де σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} - це нормальні напруження, а σ_{12} , σ_{13} , σ_{21} , σ_{23} , σ_{31} , σ_{32} - дотичні напруження (τ_{12} , τ_{13} , τ_{21} , τ_{23} , τ_{31} , τ_{32}).

Векторною характеристикою дислокації є вектор Бюргерса (\vec{b}) [201, 248]. Для його визначення потрібно порівняти між собою кристалічну ґратку заготовки без дислокації і з нею. Якщо уявити собі замкнутий контур (контур Бюргерса) у ідеальній ґратці, то присутність дислокації розімкне його. Вектором Бюргерса є вектор, який з'єднує точки розриву. Причому знак вектора Бюргерса визначається за правилом правого гвинта. Математично це записується у вигляді:

$$\oint_L du = -b, \quad (2.8)$$

де L - контур Бюргерса;

u - вектор зміщення.

Для опису руху суцільного середовища методом чисельного моделювання використовують різні конфігурації розрахункових сіток. При побудові цих сіток керуються передусім особливостями даного стану об'єкту моделювання і необхідністю досягнення прийнятної точності при використанні певного методу рішення систем рівнянь, що описують стан суцільних середовищ. Побудовані на початку розрахунку, т.зв. ейлерові сіткові лінії як правило, залишаються незмінними впродовж усього процесу розрахунку. Такий підхід добре зарекомендував себе при реологічному моделюванні статичних середовищ, в яких чітко зафіксовані або взагалі відсутні межі розподілу силової дії об'єктів моделювання. Проте, моделюючи процеси різання, ми маємо справу з динамікою дислокаційних зон, де вище описаний підхід є повністю неприйнятний, оскільки сіткові лінії не можуть бути фіксованими, а повинні адаптуватися під положення меж, що змінюються в часі в результаті утворення

стружки, деформації інструмента та заготовки тощо. В зв'язку з цим видається доцільною використання методів розрахунку динаміки суцільного середовища за допомогою, так званої адаптивної лагранжевої сітки.

Методика формування та геометричної трансформації адаптивної лагранжевої сітки зображена на Рис.2.6. При цьому координати базових точок в системі координат $(X_i; Y_i)$ визначатимуться в залежності від швидкості течії матеріалу $(V_{Xi}; V_{Yi})$ в кожній i -й точці сітки.

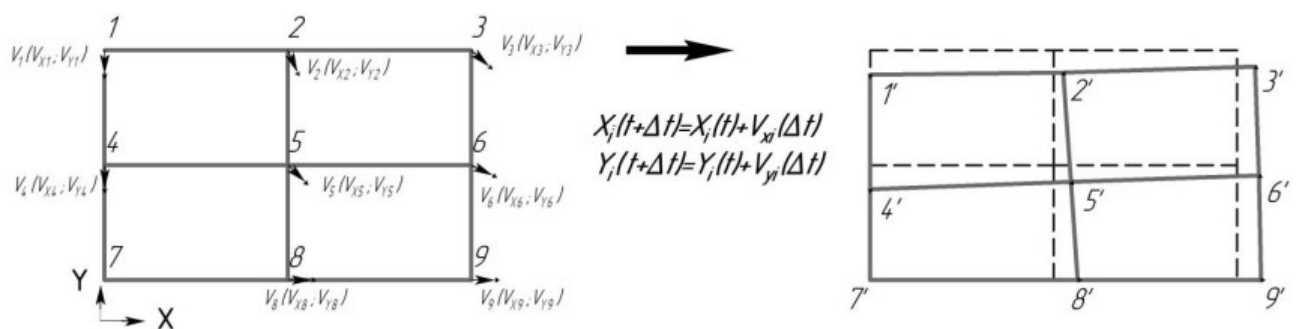


Рис.2.6. Методика геометричної трансформації адаптивної лагранжевої сітки

Ансамблювання МСЕ-моделі є наслідком об'єднання розрізаних градієнтних елементів в звичайно-елементну сітку. З математичної точки зору ансамблювання полягає в об'єднанні матриць жорсткості окремих елементів в одну глобальну матрицю жорсткості усієї конструкції оброблюваної деталі та різального інструменту. При цьому між локальними номерами і глобальними номерами вузлів існує взаємно-однозначна відповідність, на основі якої і формується глобальна система звичайно-елементних рівнянь поширення напружено-деформаційних або термічних процесів в процесі формування деталі.

Одним з найважливіших завдань при побудові сітки полягає в забезпеченні її невідроджуваності. Це обумовлено необхідністю коректної апроксимації диференціальних рівнянь, що описують реологічну модель різання. Невироджена сітка не містить окремих осередків, що перетинаються, координатних ліній або поверхонь, злиплих осередків або вузлів, і у більшості

випадків осередків з різною орієнтацією ребер і граней. У варіаційному методі не вироджена сітка будується за допомогою гомоморфного відображення параметричної області V з простору змінних (у двовимірному випадку це квадрат або прямокутник, а в тривимірному — куб або прямокутний паралелепіпед) із заданою квадратною (кубічною) сіткою на фізичну область з простору змінних $x = (a; l, \dots, x_n)$. Якщо відображення $x(\xi) : V \pm Q$, зберігає орієнтацію, тобто воно гладке, і якобіана відображення $J = \det x'(\xi)$ скрізь зберігає знак, то воно може використовуватися також і для побудови криволінійної системи координат. Відповідно спочатку ставилося завдання пошуку таких функціоналів (чи рівнянь Ейлера, що відповідають їм), щоб функції, що забезпечують їх мінімум (що і є рішенням рівнянь Ейлера) забезпечували також гладке гомоморфне відображення параметричної області на фізичну модель різання.

В сучасних програмних продуктах реологічного моделювання (Deform 2D (3D), ABAQUS, LS-Dyna) інтелектуальний генератор сітки, здатний автоматично побудувати і оптимізувати звичайно-елементну сітку, перебудувавши її у разі потреби в ході розрахунку: генератор сітки використовує проміжні результати розрахунку і будує густішу сітку в областях, де потрібно високу точність рішення. Крім того, користувач має можливість самостійно налаштувати густину сітки, розподіл її елементів по перерізу і параметри її автоматичного перестроювання (Рис.2.7)

З метою аналізу напрямку та чисельного значення руху дислокацій при різанні, в програмі Deform 2D був змодельований цей процес, де використана схема MSE і рухома лагранжева сітка (Рис.2.8). Як ми бачимо на Рис.2.8, в зоні значних силових деформацій відбувається руйнування замкнутого контуру лагранжевої сітки, що і дає можливість змоделювати напрям та чисельне значення вектору Бюргерса в зоні різання.

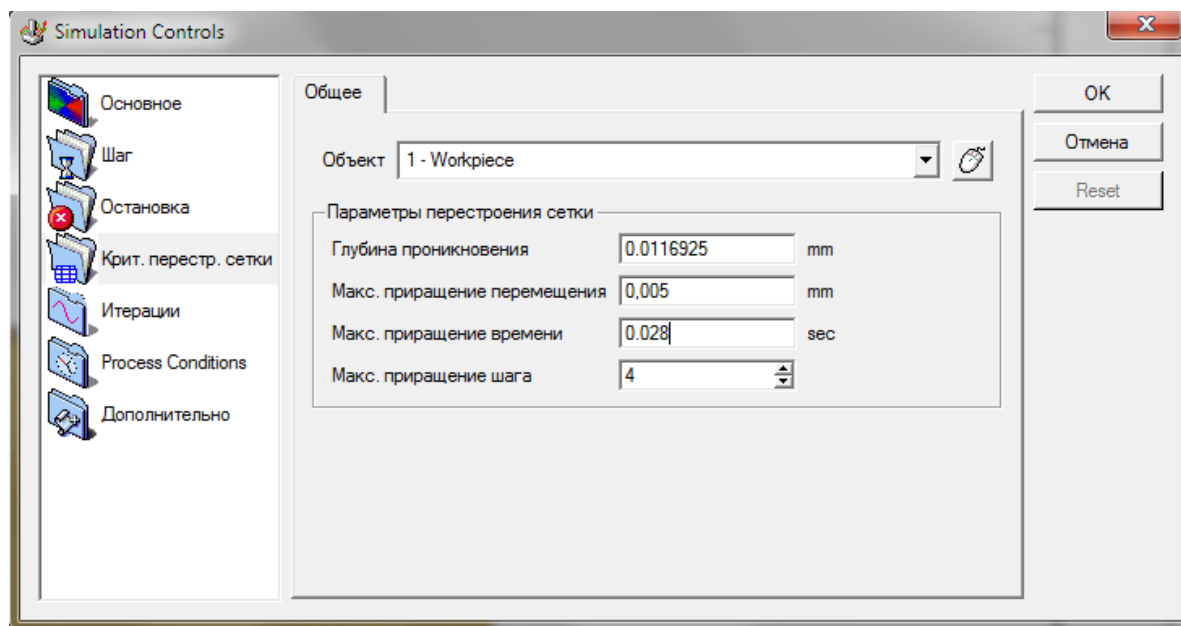


Рис.2.7. Приклад завдання параметрів критичної перебудови сітки у вкладці Simulation Controls в системі Deform

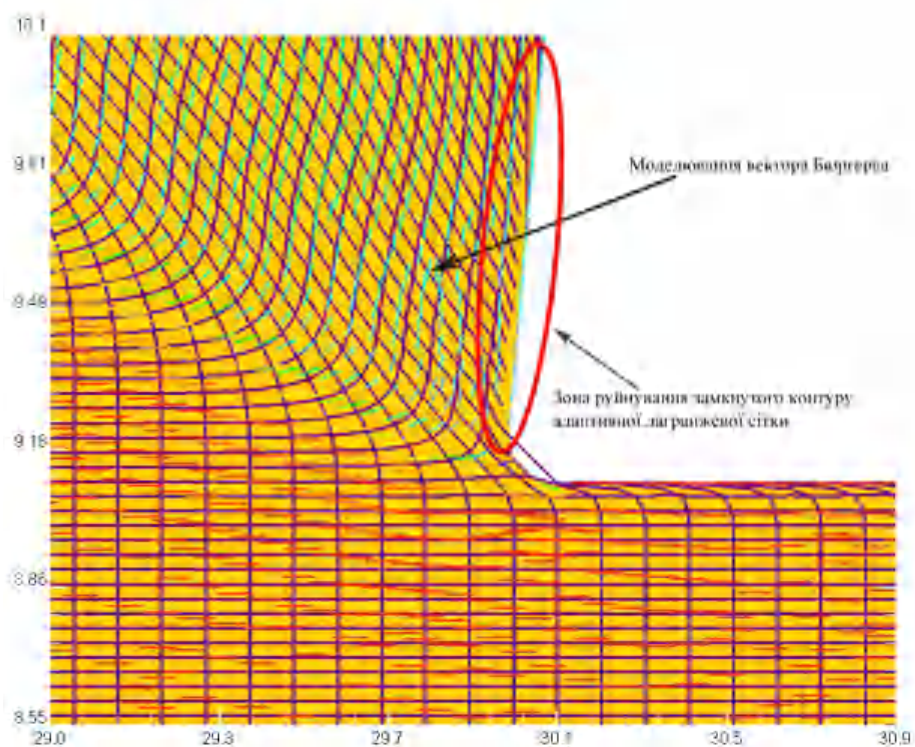


Рис.2.8. Моделювання адаптивної лагранжевої сітки та динаміки дислокацій в процесі різання.

Важливим етапом методики дослідження напружено-деформованого стану деталі в процесі її формоутворення є правильний вибір найбільш ефективного формату вирішувача МСЕ аналізу (в т.ч. для матриць нерегулярної структури) – *Sparse* або *Skyline*. З досвіду вирішення аналогічних задач можна зробити висновок, що вирішувач сполучених градієнтів *Skyline* (*Conjugate Gradient*) працює швидко і вимагає менше пам'яті, ніж вирішувач розріджених матриць *Sparse*. Однак у поєднанні з ітераційним вирішувачем він має труднощі зі збіжності рішення через проблему з недостатньою кількістю точок контакту. Було встановлено, що, наприклад, при моделюванні процесу різання з малою глибиною, як тільки в контакті виявляється невелика кількість вузлів, то з використанням вирішувача *Skyline* виникають проблеми зі збіжністю результатів дослідження. Тому саме для такого класу задач доцільно використовувати вирішувач *Sparse*. Проте, для задач з великою кількістю тетраелементів (чотирьохвузлові лагранжеві ґратки) вирішувач розріджених матриць *Sparse* вимагає більшої пам'яті, ніж може виділити комп'ютер, і тому розрахунок може зупинитися без попереджувального повідомлення. Експериментально встановлено, що для вирішувача *Sparse* максимальна межа складає 140 тис. елементів. Тому для моделювання процесів різання з товщиною різання більше 0,5 мм більш ефективно використання вирішувача *Skyline*.

Деформований стан металу, що перейшов в стружку, може бути наслідком накладення на деформацію простого зсуву (зсув в перехідній зоні, що пластично деформується) неоднорідної деформації двовісного стиску (чистого зсуву) і вторинної неоднорідної зсувної деформації паралельно передньої грані інструменту. Неоднорідні компоненти деформації обумовлюють появу в різних горизонтах перерізу стружки різниці в швидкостях руху. Звичайне прискорення руху внаслідок деформації стиску переважає, і стружка після виходу з контакту завивається. Вторинна зсувна деформація стружки зменшує її завивання, а якщо сила тертя на передній

поверхні суттєво зростає, то внаслідок цього посилення вторинної зсувної деформації призводить до збільшення радіусу завивання стружки – аж до її випрямлення. Це обумовлено відносно низькою густиною дислокацій, яка недостатня, щоб забезпечити можливість якого-небудь виду руху усередині металу. Адже дислокації роблять структуру металу більше розрідженою і внутрішньо напруженою. Метал стає більш текучим і по ряду властивостей наближається до рідкого стану. Тому моделювання процесу руйнування матеріалу заготовки і формоутворення деталі методом скінчених елементів можна вважати реологічним моделюванням. Це вид імітаційного моделювання, що формалізує термодинамічні та силові процеси текучості та деформацій, в яких в будь-який проміжок часу величина деформації пропорційна прикладеному напруженню. Таким чином, матеріал заготовки в зоні стружкоутворення проявляє одночасно пластичні (в'язкісні) та пружні властивості. Причому, вкрай важливо, що реологія розглядає діючі на деталь в процесі її оброблення напруження і викликані цією дією деформації як зворотні (пружні), так і незворотні (залишкові). Таким чином, ми можемо розглядати взаємозв'язок генерованих процесом різання короткочасних напружень в зоні різання з залишковими напруженнями та деформаціями, що визначатимуть в майбутньому якість експлуатації об'єкта виробництва, що і є основою побудови функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

Для більшості методів механічного оброблення, коли деформація металу визначається дією розтягувальних або стискаючих навантажень, формується однотипний розподіл ліній ковзання, що змінюється в поверхневих шарах дією контактних навантажень. Для ілюстрації адекватності результатів імітаційного моделювання можна порівняти текстуру матеріалу в зоні стружкоутворення, знятої на растровому електронному мікроскопі при токарному обробленні конструкційної сталі AISI 1020 (аналог - сталь 20) [34] (Рис.2.9(а)) та змодельовану деформаційну лагранжеву сітку в реологічній моделі різання тієї ж сталі (Рис.2.9(б)).

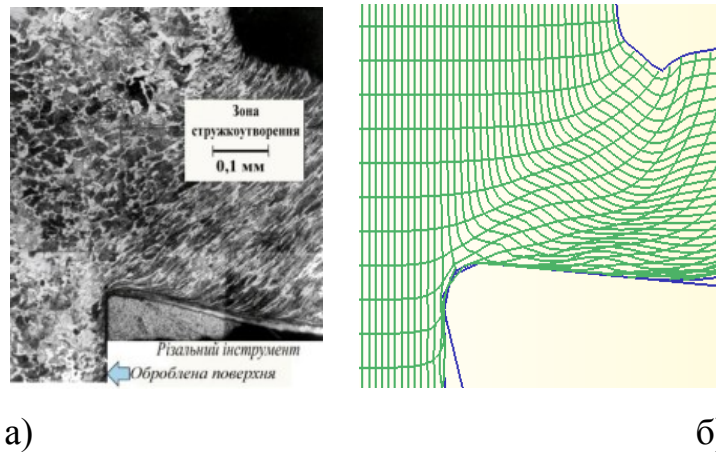


Рис.2.9. Порівняння натурної текстури матеріалу у макроскопічному збільшенні в зоні стружкоутворення (а) і деформації лагранжевої сітки (б) в результаті реологічного моделювання процесу токарного оброблення сталі 20 (AISI 1020) в системі Deform 2D.

На Рис.2.10 можна спостерігати майже тотожне співпадіння текстури матеріалу і деформації лагранжевої сітки, що виражається у S-подібній формі деформованої сітки в зоні зсуву (зона 1), параболічній її формі в зоні утворення стружки (зона 2) та Г-подібно спотвореній сітці на обробленій поверхні заготовки (зона 3)

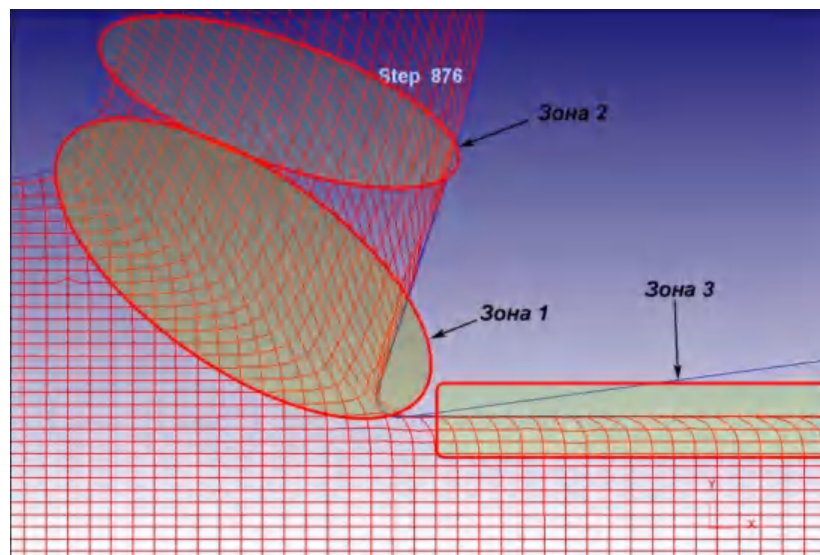


Рис.2.10. Зони спотворення лагранжевої сітки в зоні різання

Таким чином, суть процесу перетворення властивостей матеріалу при різанні, як і в усіх інших відомих технологічних методах оброблення, полягає в

порушенні його поточного рівноважного стану. Єдиним фізичним інструментом зміни рівноваги є енергія, під впливом якої починають діяти фізико-хімічні процеси, які прагнуть підтримати рівноважний стан матеріалу в нових енергетичних умовах. При цьому руйнуються старі атомарно-молекулярні зв'язки і утворюються нові. В результаті після відновлення параметрів структури і властивостей матеріалу, що зазнав додаткову енергетичну дію, відрізнятимуться від початкових. Взаємодія механічних полів супроводжується при різанні взаємодією температурних полів, хімічними та дифузійними процесами і великою кількістю інших процесів і явищ, одночасне протікання яких і забезпечує перебудову структури матеріалу, його пошарову і наноструктурну дефрагментацію і руйнування, утворення нових атомно-молекулярних зв'язків [201, 326]

Саме з цих міркувань, розглянемо математичну модель розвитку та механіки руйнування дислокацій при різанні пружно-пластичного матеріалу заготовки. Припустимо, що зона різання заготовки з відповідною дислокацією є областю суцільного середовища, розміри якого досить великі, завдяки чому геометрія зовнішніх меж істотно не впливає на зміщення поблизу центру. В стані розтягу основні машинобудівні матеріали мають невисоку пластичність, тобто вони руйнуються за умови досягнення відносно невисокого ступеня деформації. Проте, при різанні пластичність металу значно зростає, оскільки в перехідній пластично-деформованій зоні елементарні об'єми зрізаного шару знаходяться в умовах гідростатичного тиску (рівнобічного стиску) σ_{11}, σ_{22} і одночасно – під дією дотичних напружень τ_{12}, τ_{21} (Рис.2.11). Крім того, зростанню пластичності сприяє температурний вплив деформованого об'єму металу [66].

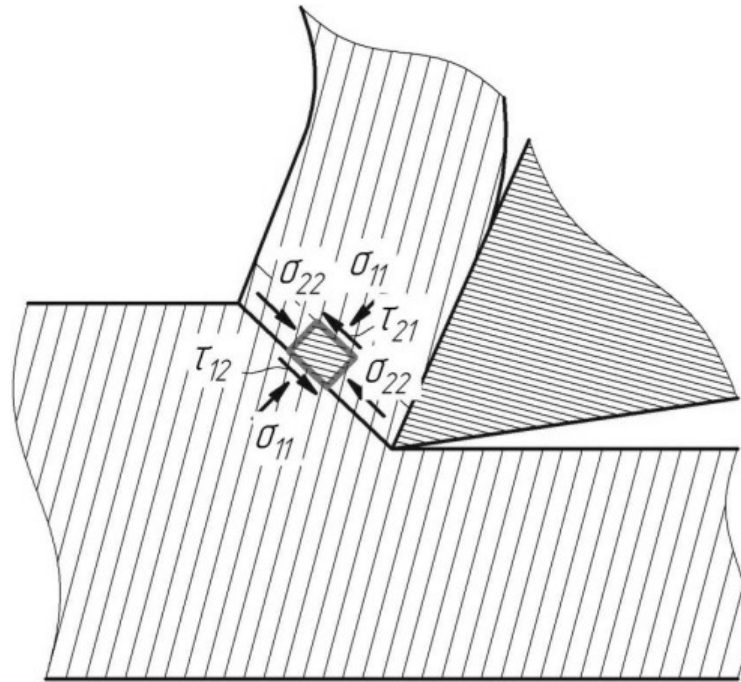


Рис.2.11. Тензори напружень у перехідній пластично-деформованій зоні

При високих швидкостях деформування ($d\varepsilon/d\tau = 10^5 \dots 10^6 \text{ c}^{-1}$) більшість матеріалів, що використовуються у машинобудуванні (сталі, чавуни) демонструють аномальну температурну залежність, пов'язану власне з перебудовою механізму руху дислокацій [249, 263]. Термофлуктаційний механізм змінюється на механізм фонового опору, в результаті чого залежність опору матеріалу від температури стає прямо протилежною: із збільшенням температури зростає міцність матеріалу заготовки.

Важливим етапом моделювання процесу різання є адекватне встановлення характеру руйнування – крихке або пластичне. Межа між різними видами руйнування досі розмита і не є чітко обкресленою. Досі немає загальноприйнятого визначення крихкого руйнування. Ось деякі з них [201]:

1. Руйнування вважається крихким, якщо для його протікання і завершення досить пружної енергії зруйнованої заготовки.

2. Крихким є руйнування, при якому нестабільне зростання тріщини в зоні силової дії різального клину відбувається при напруженні, меншій від межі текучості $[\sigma_T]$.

3. Крихким є руйнування без значних пластичних деформацій ε .

4. Якісна відмінність між випадками крихкого і пластичного руйнування заготовки пов'язана із швидкістю поширення тріщини. При крихкому руйнуванні ця швидкість дуже велика - досягає 40...50% швидкості поширення звуку в матеріалі зразка. У разі ж в'язкого руйнування, тріщина поширюється з відносно малою швидкістю, приблизно рівною інтенсивності деформації матеріалу в зоні стружкоутворення - $\dot{\varepsilon}$.

Моделювання процесів руйнування основане на уявленні про руйнування як про втрату здатності матеріалу до опору деформації внаслідок порушення внутрішніх зв'язків з ростом концентрації мікротріщин. Слід також зауважити, що ідеальних умов руйнування не існує в природі [43, 190]. Будь-який матеріал можна лише з певним допущенням віднести до крихких або пластичних матеріалів, для яких характерні відповідні умови оброблення та математичний апарат, що їх описує або імітує. В інженерній практиці прийнято, що міцність ідеально крихкого матеріалу на стискання у вісім разів перевищує його міцність на розтяг [230]. Причому, для крихких матеріалів вважається, що руйнування відбувається миттєво за умови досягнення критерію руйнування. Такі моделі розглядаються в рамках механіки крихкого руйнування шляхом явного виділення поверхонь руйнування як контактних розривів магістрального типу. Математичний опис процесів крихкого руйнування стикається зі значними складностями при описі зародження та розвитку тріщин, особливості їх мультиплікації. Тому в механіці деформованих середовищ для розрахунку випадків різання крихких матеріалів використовують континуальний опис руйнування [201]. Такий підхід передбачає опис руйнування як процесу на основі визначальних рівнянь, записаних в єдиній формі для зруйнованого і незруйнованого стану матеріалу заготовки. Континуальний підхід описує появу і розвиток поверхонь і зон руйнування без явного їх виділення, що відповідає методам наскрізного розрахунку, описаного в роботах Майнчена і Сака [27, 201, 190], і реалізується теорією скінчених елементів.

При обробці крихких матеріалів кінетика руйнування не враховується, тобто при досягненні критерію руйнування напружено-деформований стан заготовки і інструмента в малому об'ємі комірки рухомої лагранжевої розрахункової сітки проходить стрибкоподібно. З іншої сторони, зменшення напружень в заготовці внаслідок втрати матеріалом здатності до опору деформації здійснюється за умови незмінної деформації [66, 235, 248, 271]. Це свідчить про те, що при континуальному описі, процеси деформації металорізального інструменту та руйнування заготовки слід трактувати як незалежні (що не виключає взаємовпливу), а розвиток руйнування слід характеризувати не деформацією, а власним критерієм деформації, що залежить, в першу чергу, від інтенсивності деформації (Рис.2.12) [66, 271]

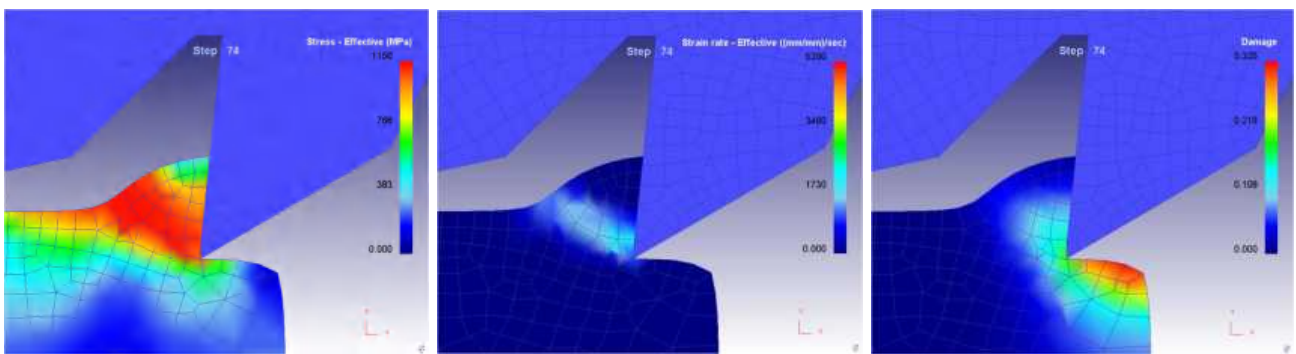


Рис.2.12. Приклад імітаційного моделювання та розрахунку показників еквівалентного напруження, швидкості зміни інтенсивності деформації та критерійного показника руйнування під час фрезерування заготовки (матеріал – сталь 35 , $S=60$ мм/хв; $n=100$ хв⁻¹; $V=88$ м/хв.)

Крихке руйнування супроводжується мінімальним поглинанням енергії і при швидкостях руйнування, близьких до швидкості звуку в тому ж самому середовищі і є наслідком присутності в матеріалі субмікроскопічних тріщин з атомарно гострими кінцями, де концентрація напруження перевищує здатність тіла чинити опір цьому напруженню. Умова такого руйнування, за Гріффітсом [230], полягає в тому, що нескінченно гостра еліптична тріщина з головною піввіссю c , нормальною до напрямку одновісного розтягуючого напруження σ_0 ,

що знаходиться в деталі з модулем пружності E , може досягти точки своєї нестабільності. У цій точці збільшення поверхневої енергії, необхідної для зростання тріщини, може бути отримане за рахунок енергії пружної деформації тих частин напруженої деталі, через які поширюється руйнування. Номінальне напруження в точці руйнування дорівнює [190, 201]:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{2\alpha E}{\pi c}}, \quad (2.9)$$

де α - питома поверхнева енергія заготовки.

На відміну від крихкого руйнування при пластичному руйнуванні до відокремлення стружки від заготовки повинна виникнути велика залишкова деформація. Граничний випадок розділення далі на окремі частини в результаті в'язкої або пластичної деформації, що триває до тих пір, поки площа поперечного перерізу не зменшиться до нуля є розривом. Коли пластична деформація набуває граничного значення, але утворюється поверхня зламу і величина деформації є меншою, ніж при розриві, процес підлягає закону пластичного руйнування.

Оскільки руйнування починається при певній комбінації напруження і деформацій, аналіз випадків, що ґрунтується на розгляді структури та руху дислокацій, призводить до руйнування, критерій настання якого значно більше залежить від передісторії напруження і деформацій, ніж умови пластичності. Він вказує також на сильну залежність руйнування від анізотропії включень, біля яких відбувається зростання концентраторів напружень, і від відношення розміру цього концентратора до відстані між включеннями. При дуже великих концентраціях деформацій, що виникають за наявності тріщин, пластичне руйнування може початися вже при номінальному напруженні нижче межі текучості $[\sigma_T]$. Тоді, навіть якщо матеріал і пластичний, конструкція руйнується крихко в тому сенсі, що загальна величина пластичної деформації до руйнування мала.

Основною характеристикою матеріалу при механічному обробленні є

модуль зсуву G , що характеризується відношенням дотичного напруження τ_{xy} до зсувної деформації ε_{yz} :

$$G = \frac{\tau_{yz}}{\varepsilon_{yz}} = \frac{P_z/A}{\Delta_y/a} = \frac{P_z \cdot a}{A\Delta_y} \quad (2.10)$$

Де $\tau_{yz} = P_z/A$ – дотичне напруження зсуву при різанні;

P_z – складова сили різання, направленої в напрямку зсувного вектора;

A – площа, на якій діє сила F ;

$\varepsilon_{yz} = \Delta_y/a$ – відносний зсув;

a – товщина зрізу.

Крихке руйнування і розрив є граничними формами руйнування. Між ними лежить пластичне руйнування, що визначається як розділення тіла у присутності деякої пластичної деформації, але за наявності ясно вираженої поверхні руйнування і при меншій деформації, ніж у разі розриву. Іноді, пластична деформація обмежується деформацією по межах зерен, яка потрібна для злиття крихких тріщин зсуву в окремих зернах [201].

Розглянемо реологічну модель квазікрихкого різання пружнопластичних матеріалів. При цьому робиться спроба подолання вищенаведених недоліків при вирішенні задачі руйнування, що дозволяє прослідкувати за розвитком магістральних тріщин у вигляді полос квазікрихкого руйнування, що спричинюють стрибки швидкості руйнування та спалахи деформацій. Модель справедлива для випадків граничних пластичних деформацій і враховує ту обставину, що руйнування супроводжується зміною режиму деформування від квазістатичного за відсутності руйнування до суто динамічного при розвитку вузьких зон локалізації деформацій.

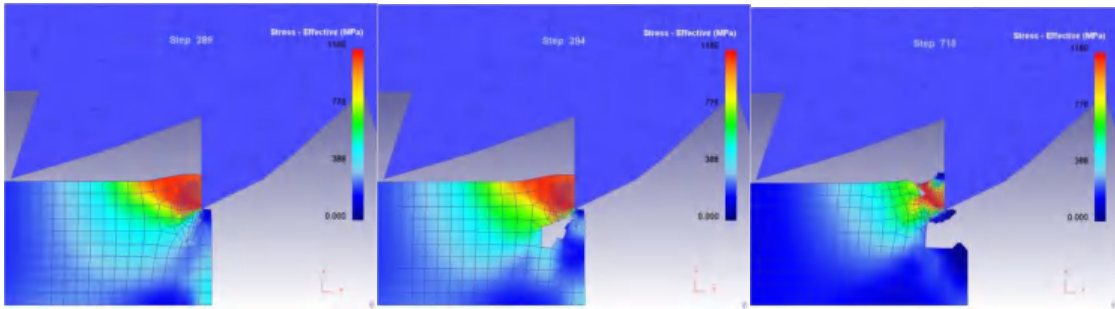


Рис.2.13. Приклад крихкого руйнування заготовки при фрезеруванні в динаміці (матеріал – чавун СЧ30 , $S= 60$ мм/хв.; $n=100$ хв⁻¹; $V=88$ м/хв.)

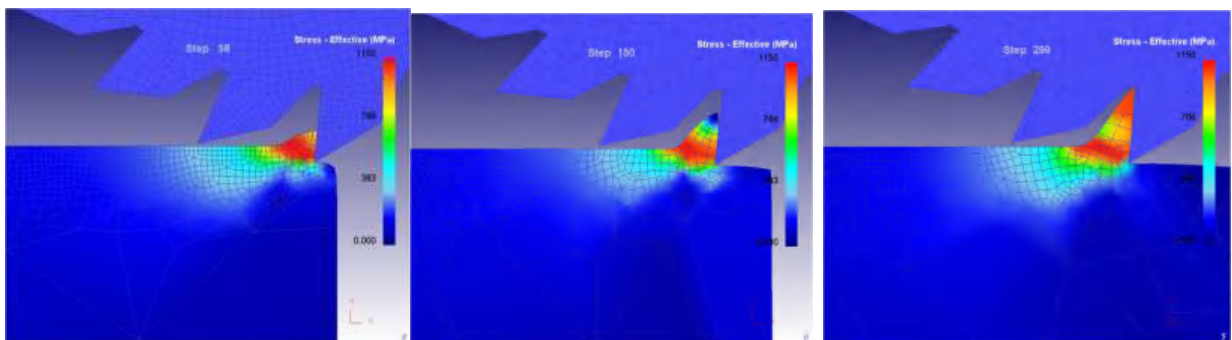


Рис.2.14. Приклад пластичного руйнування заготовки при фрезеруванні в динаміці (матеріал – сталь 35 , $S= 60$ мм/хв.; $n=100$ хв⁻¹; $V=88$ м/хв.)

У стані механічної рівноваги прикладена зовні сила діє лише на поверхню заготовки. Всередині цієї заготовки та інструмента справедливе твердження, що кожен об'єм діє на сусідній з такою ж силою, що й сусідній діє на нього самого (третій закон Ньютона). В такому випадку справедливе рівняння рівноваги, що визначає деформацію тіла:

$$\varepsilon_i = \sum_k \frac{d\sigma_{ik}}{dx_k} = 0 \quad (2.11)$$

Оскільки на тіло (в даному випадку – заготовку) діють так звані деконцентровані (площинні або об'ємні) сили різання, рівняння рівноваги набирає вигляду:

$$\sum_k \frac{d\sigma_{ik}}{dx_k} = \rho E$$

де ρ — густина заготовки;

$\dot{\varepsilon}$ – ейлерів тензор інтенсивності деформації як результат дії сил різання в розрахунку на одиницю об'єму.

Система рівнянь, що описує поведінку термопружнопластичної заготовки в процесі її різання, розроблена на основі класичного термодинамічного аналізу [66, 179]. Система рівнянь відображає закони збереження енергії, маси та імпульса, а також кінематичні відношення:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \dot{\varepsilon} : \mathbf{I} = 0, \quad \rho \frac{d\mathbf{S}}{dt} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0, \quad \rho \frac{d\mathbf{S}}{dt} = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\varepsilon} + \nabla \mathbf{q} + \rho \mathbf{r} = 0, \\ \mathbf{F}^{-1} = \nabla x^0, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\mathbf{I} - \mathbf{F}^{-T} \cdot \mathbf{F}^{-1}), \quad \dot{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\mathbf{L} + \mathbf{L}^T), \\ \mathbf{E} = \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt} + \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{L} + \mathbf{L}^T \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \mathbf{L} = \nabla \mathbf{S}, \quad \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{S}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

де \mathbf{S} – подача інструменту;

\mathbf{x} – поточне положення інструменту (ейлерів радіус-вектор);

x^0 - початкове положення інструменту (лагранжів радіус-вектор);

\mathbf{F} – градієнт деформації,

\mathbf{L} – градієнт швидкості різання;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ - тензор деформації;

$\boldsymbol{\sigma}$ - тензор напруження Коші;

U – внутрішня енергія одиниці об'єму заготовки;

\mathbf{q} – вектор теплового потоку

Тензор деформації - математичний об'єкт, який характеризує зміщення кожної точки тіла при деформації.

Тензор деформації визначається, як [190]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{dh_i}{dx_j} + \frac{dh_j}{dx_i} \right), \quad (2.13)$$

де \mathbf{h} — вектор, який описує зміщення точки тіла.

У випадку розгляду ортогональної моделі різання тензор деформації симетричний, тобто $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \boldsymbol{\varepsilon}_{ji}$. Як і для тензора напруження, діагональні

елементи тензора деформації описують лінійні деформації розтягу чи стиску, недіагональні - деформацію зсуву.

Складова швидкості дисипації, що характеризує пластичні деформації заготовки, є однорідною функцією першого порядку від швидкості цієї пластичної деформації, що відповідає випадку пружнопластичного середовища, незалежного від зміни масштабу часу протікання процесу різання. Очевидно, що пластичне деформування збільшується за умови активного навантаження. Опір середовища, що характеризується модулем пружності (для різання – модулем зсуву G і межею текучості σ_T), окрім температури залежить також від додаткового параметру стану, що характеризується критерієм руйнування D . Кінетика процесу руйнування визначається залежністю швидкості дисипації від швидкості зміни критерію руйнування.

Таким чином, дислокації виявляють подвійну дію на міцність матеріалу та опору різанню. Так, збільшення кількості дислокацій до певної межі призводить до різкого зниження міцнісних якостей матеріалу, проте, починаючи з певної концентрації, дислокації, взаємодіючи між собою а також з недосконаlostями у кристалічній ґратці інших видів [128, 157, 163], збільшують міцність матеріалів, що підтверджує припущення, висловлені проф. Подураєвим [232]. Причому, максимальна міцність визначається деякою густиною дислокацій – $10^7 - 10^8$ на 1 см^2 .

2.2.2. Аналіз та вибір критерію локального руйнування при різанні

Дослідження і опис основних закономірностей протікання різних процесів при механічному обробленні дозволяє підійти до пояснення масопереносу в умовах стружкоутворення, сформулювати основні принципи інтенсифікації різних процесів при обробленні металів. Дослідження процесів високошвидкісної деформації і руйнування матеріалів, з одного боку, дозволяє судити про динаміку зміни стану речовин на субструктурному рівні за характером протікання процесів, а з іншого боку, розробити якісно нові фізичні

принципи інтенсифікації методів обробки, контролю процесу обробки і діагностування стану різального інструменту. На основі всебічного вивчення взаємозв'язку деформаційних, післядеформаційних процесів і процесів руйнування матеріалів, структурних змін в умовах високих швидкостей обробки можливий науково-обґрунтований підхід до використання отриманих результатів при оптимізації режимів різання. Врахування проміжних станів матеріалу заготовки під час різання в рамках механіки локального руйнування вимагає аналізу існуючих розрахункових концепцій та моделей. В основі класичної теорії руйнування лежать моделі, що базуються на критеріях руйнування. Їх умовно поділяють на три групи: силові, деформаційні та енергетичні [189, 201].

Слід відзначити, що єдиної концепції для аналітичного опису механізмів руйнування не існує, так само як і універсального критерію руйнування, по якому однозначно можна було б судити про фізику процесу різання [272]. В даний момент можна говорити про адекватну теоретичну розробленість лише окремих випадків і спроби їх узагальнення. Тому важливим етапом даної наукової роботи є створення реологічної моделі руйнування, що дозволяє на підставі універсальних визначальних співвідношень розглянути усі стадії процесу різання, починаючи із стадії пружної деформації і закінчуючи стадією розділення стружки, формоутворення заготовки і досліджувати закономірності появи залишкових напружень та деформацій, що суттєво впливатимуть на функціональні властивості деталей в процесі їх майбутньої експлуатації.

Процес стружкоутворення базується на методі «ерозії елементів», який полягає в еволюції тріщини, залежної від стану напруження та деформацій в тілі заготовки. Застосування такого закону включає два критерії. Перший критерій характеризує необхідну міру руйнування матеріалу, а другий - відповідає за еволюцію тріщини, її поширення і рух дислокацій.

Розповсюдженим деформаційним критерієм руйнування є критерій Мак-Клінтока [43]. За цією теорією, здатність пластичного матеріалу заготовки до

руйнування силовою дією різального клина може бути оцінена шляхом порівняння напружено-деформованого стану зі станом ідеального пластичного матеріалу. При великих концентраціях деформацій, як, наприклад на вершині різального клина інструмента, пластичне руйнування може відбутися при номінальних напруженнях зсуву, менших від межі текучості [201].

Якщо припустити, що руйнування заготовки відбудеться при поздовжньому зсуві, коли в області ρ_s матеріалу (деформація якого дорівнює ε_T) пройшла сумарна деформація ε_T^{dun} , то при зсуві тріщина довжиною c стане нестабільною, коли дотичне напруження σ_{23} досягне критичної величини:

$$\sigma_{23} = G \cdot \varepsilon_T \sqrt{\rho_s \left[\exp \left(\sqrt{\frac{2\varepsilon_T^{dun}}{\varepsilon_T}} - 1 \right) \right]} / c \quad (2.14)$$

Ця тенденція до руйнування і створення зони нестабільності може бути описана за допомогою наближеного розміру пластичної зони або коефіцієнту інтенсивності напружень пружного поля.

Проте, всі ці силові та деформаційні критерії у випадку моделювання процесів різання не дозволяють при моделюванні отримати адекватної картини руйнування заготовки та зношування інструменту. У більшості випадків вони дають занижені значення критичних напружень і деформацій при моделюванні процесів механічного оброблення [83]. Проте за допомогою підпрограм користувача в універсальних системах можуть бути використані і інші критерії руйнування.

До спеціалізованих програм, що дозволяють досліджувати пластичні деформації в зоні різання належать такі програмні продукти: DEFORM 3D (2D), ABAQUS, AdvantEdge, LS-Dyna. Найбільш функціональні автоматизовані системи моделювання технологічних процесів, такі як DEFORM, за можливостями моделювання руйнування при пластичній деформації суттєво переважають універсальні системи. В них реалізовано досить багато критеріїв руйнування, таких як нормалізований критерій Кокрофта-Лейтема [201, 272]:

$$D = \int \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon},$$

де $\bar{\varepsilon}$ - накопичена еквівалентна деформація;

σ_{\max} - максимальне ефективне напруження;

$\bar{\sigma}$ - еквівалентне напруження по Мізесу.

Іншим енергетичним критерієм є критерій Райса-Трейсі [201, 272]:

$$D = \int e^{\frac{\alpha \sigma_m}{\bar{\sigma}}} d\bar{\varepsilon}$$

де α - коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу;

σ_m - гідростатичний тиск.

Критерії руйнування Кокрофта-Лейтема і Райса-Трейсі є енергетичними і оснований на обчисленні потенційної енергії пластичної деформації, тобто площі фігури, що обмежується кривою деформація-напруження. Енергетичні критерії дозволяють досить адекватно оцінювати можливість руйнування заготовки при сталих режимах різання з нескладною траєкторією руху інструменту. Такі критерії вважаються універсальними і, як правило, не потребують додаткових експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалу заготовки і інструменту. В той же час, вони не враховують ряд важливих особливостей поведінки матеріалу заготовки під час оброблення поверхонь зі складною геометрією, що інструмент різко змінює напрям подачі, швидкість різання, що призводить до заниженню критичних напружень і деформацій, а відтак, до неадекватного опису та реологічної моделі руйнування і спотворення результатів імітаційного моделювання процесу різання.

Таким чином, критерії руйнування, які можливо ефективно використовувати в кінцево-елементних системах моделювання, призначених для аналізу двовимірної (2D) або тривимірної (3D) реології металу при різних процесах обробки різанням, таких як Deform 2D (3D), LS-Dyna, ABAQUS або AdvantEdge можна подати у вигляді таблиці 2.1

Табл.2.1. Загальна характеристика найбільш розповсюджених критеріїв руйнування в САФ системах

№	Назва критерію	Узагальнена модель руйнування
1	Критерій Фроденталя [22]	$D_1 = \int_{\bar{\varepsilon}} \sigma d\bar{\varepsilon}$
2	Критерій Кокрофта-Лейтема [201]	$D_2 = \int_{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}$
3	Критерій МакКлінтока [43]	$D_3 = \int_{\bar{\varepsilon}} \left[\frac{2}{\sqrt{3}(1-n)} \sinh \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)}{2} \cdot \frac{\sigma_{S\min} + \sigma_{S\max}}{\bar{\sigma}} \right\} + \frac{\sigma_{S\max} - \sigma_{S\min}}{\bar{\sigma}} \right] d\bar{\varepsilon}$
4	Критерій Райса-Трейсі	$D_4 = \int_{\bar{\varepsilon}} \exp \left(\frac{\alpha \sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon}$
5	Критерій Ойада [4]	$D_5 = \int_{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}$
6	Критерій Осакада [46]	$D_6 = \int_{\bar{\varepsilon}} \langle \bar{\varepsilon} + a\sigma_m - b \rangle d\bar{\varepsilon} \quad \langle x \rangle = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$
7	Критерій Броззо [48]	$D_7 = \int_{\bar{\varepsilon}} \frac{2[\sigma]}{3([\sigma] - \bar{\sigma})} d\bar{\varepsilon}$

де σ_m - середнє значення напруження, МПа;

$\bar{\sigma}$ - поточне значення напруження, МПа;

σ_s - максимальне напруження руйнування, МПа;

$\bar{\varepsilon}$ - поточне значення деформації, мм/мм;

$\sigma_{S \max}, \sigma_{S \min}$ - максимальне та мінімальне напруження руйнування (утворення мікротріщини) [272].

Підсумовуючі вищесказане, у загальному вигляді будь-який критерій руйнування D , представлений в табл. 2.1., може бути представлений у вигляді формули:

$$\int F(\text{показник напружено – деформованого стану заготовки}) d\bar{\varepsilon} = D \quad (2.15)$$

Тобто, значення критерію руйнування у визначеній точці заготовки представляється інтегралом, що може бути визначений з формули (2.15).

Щоб за допомогою МСЕ обчислити напружено-деформований стан заготовки при різанні, необхідно спочатку розбити дане тіло на елементи і визначити відповідні константи матеріалу. Потім, поступово збільшуючи навантаження і задовольняючи заданим граничним умовам, можна провести рішення пружнопластичності. Для кожного кроку навантаження визначають різні параметри (переміщення, деформацію, напруження, енергію деформації і тому подібне). Далі за допомогою цих параметрів обчислюється критерій руйнування різними способами.

Для аналізу ефективності використання того чи іншого критерію руйнування проведено порівняння результатів чисельного моделювання деформації і руйнування заготовки зі сталі 35, при динамічних навантаженнях, що виникають в процесі точіння заготовки при різних режимах різання. Чисельне моделювання деформації і руйнування матеріалів здійснювалося з використанням найбільш характерних для програмного продукту Deform 2D нормалізованих енергетичних та деформаційних критеріїв руйнування: Кокрофта-Лейтема, Райса-Трейсі і МакКлінтока.

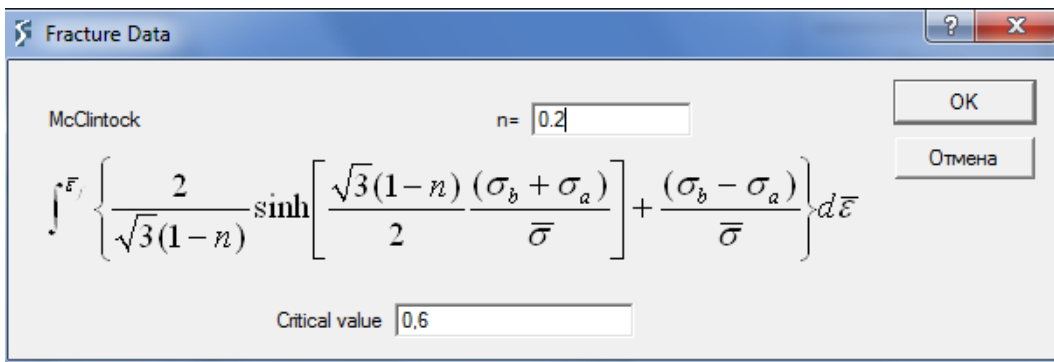
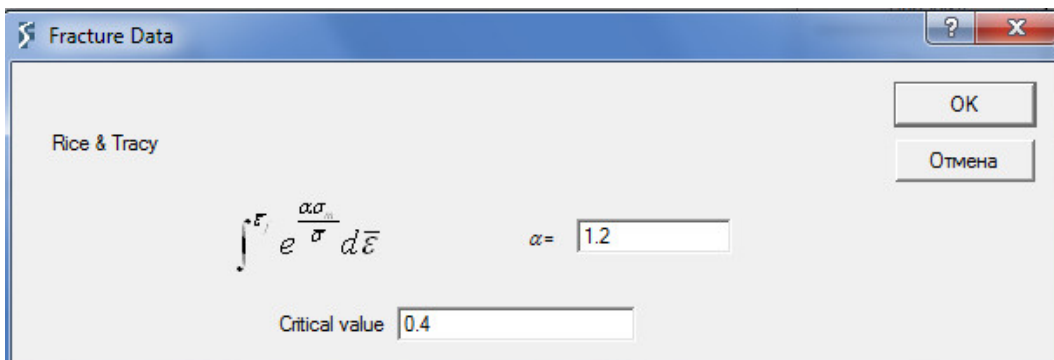
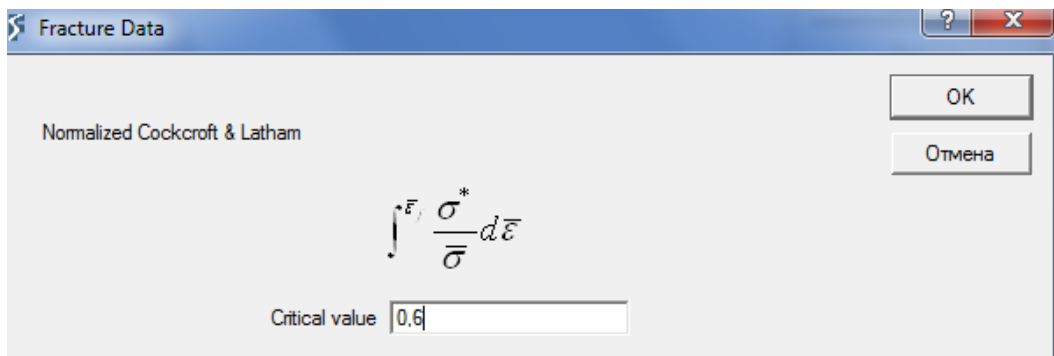
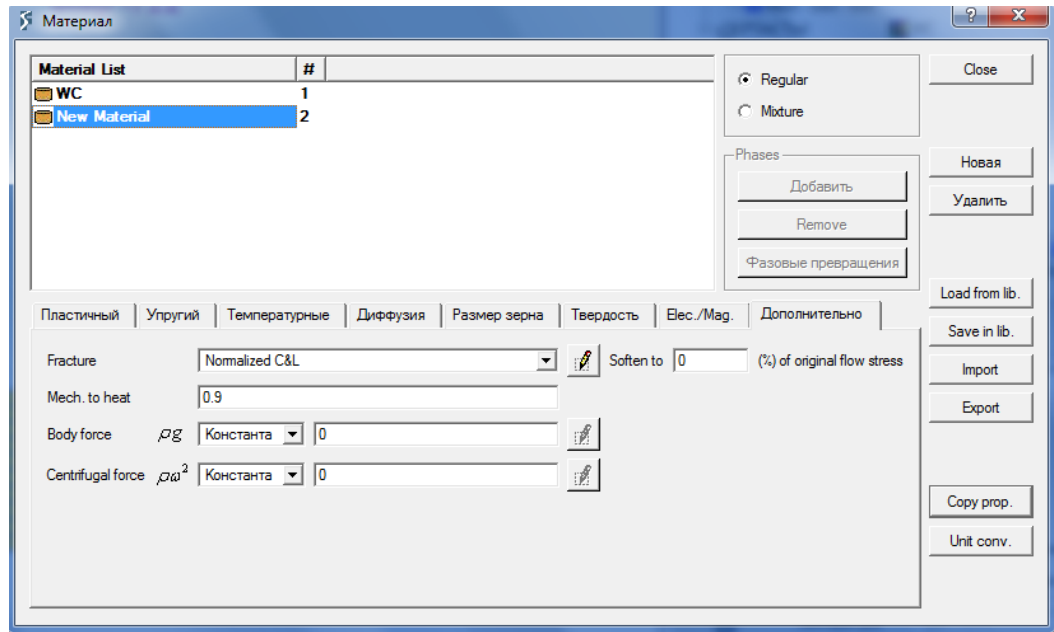


Рис.2.15. Завдання критеріїв руйнування в системі Deform 2D

Приведений порівняльний аналіз підсумкових картин руйнування гомогенного ізотропного матеріалу, яким є сталь 35, з використанням в різних комбінаціях глибини різання. Метою цього дослідження є аналіз впливу застосування різних механічних характеристик руйнування заготовки в критеріях міцності на результати чисельного моделювання деформації і руйнування методом зсуву при локальному навантаженні жорстким різальним клином. Як чисельний метод використовується метод кінцевих елементів, модифікований Г. Р. Джонсоном [30].

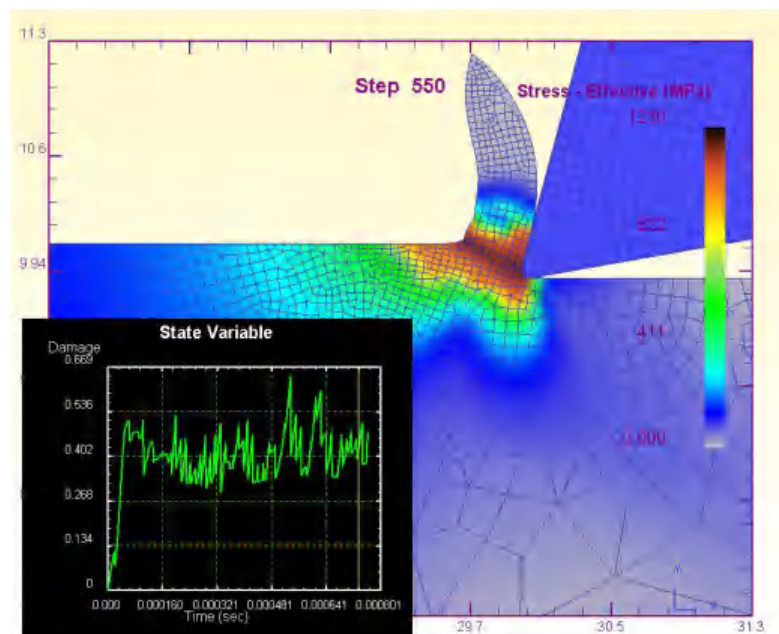


Рис.2.16. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування Кокрофта-Лейтема (метод оброблення – точіння, матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=0,2$ мм, $S=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

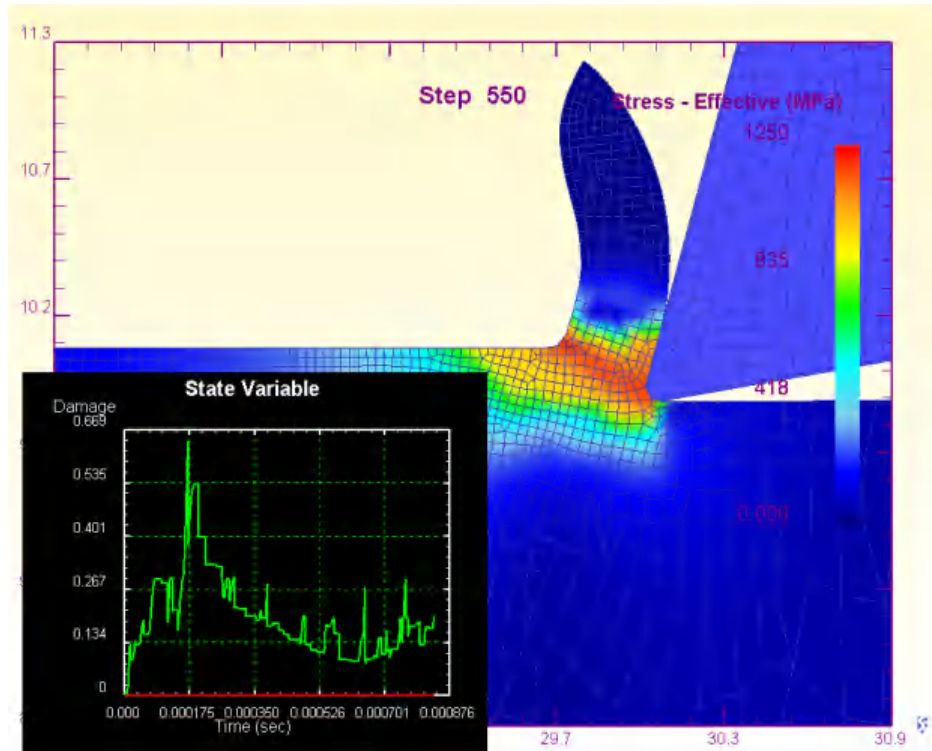


Рис.2.17. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування Райса-Трейсі (метод оброблення – точіння , матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=0,2$ мм, $S=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

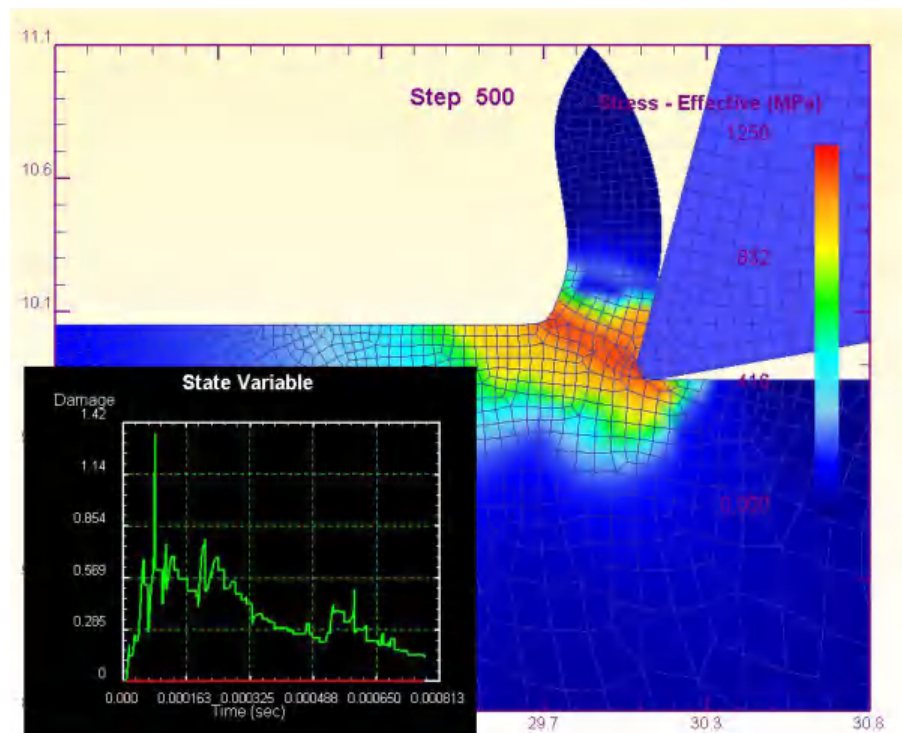


Рис.2.18. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування МакКлінтока (метод оброблення – точіння , матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=0,2$ мм, $S=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

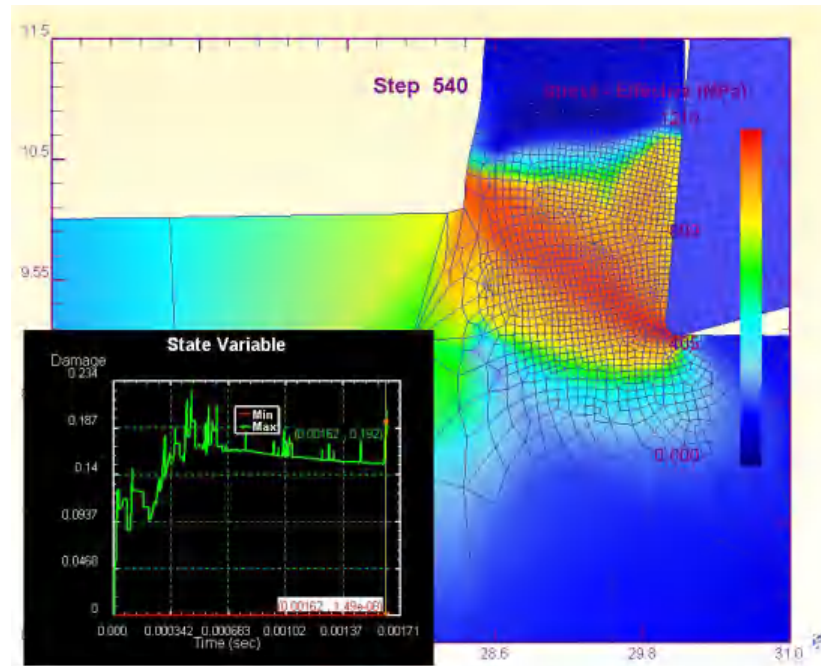


Рис.2.19. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування Кокрофта-Лейтема (метод оброблення – точіння , матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=1,0$ мм, $S=0,25$ мм; $V=150$ м/хв)

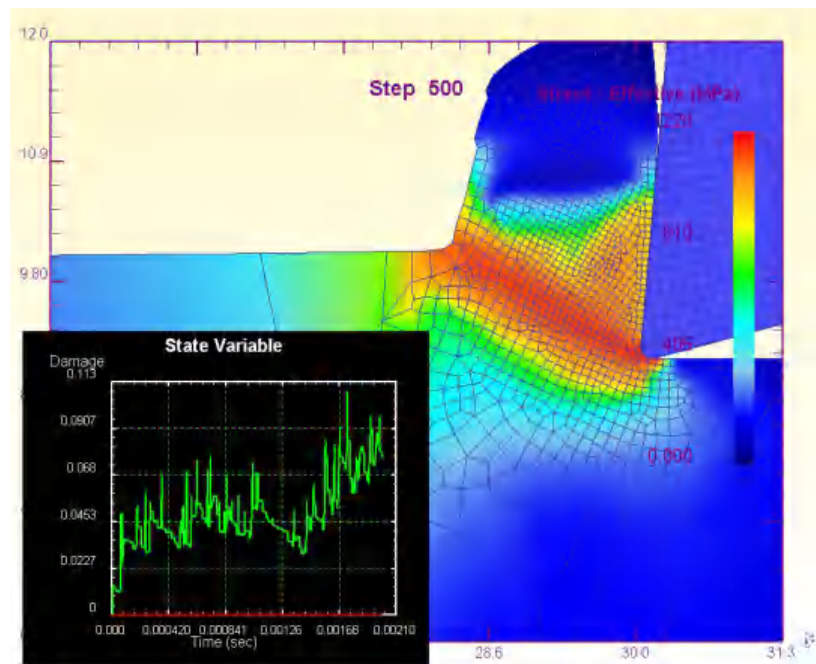


Рис.2.20. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування Райса-Трейсі (метод оброблення – точіння , матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=1,0$ мм, $S=0,25$ мм; $V=150$ м/хв)

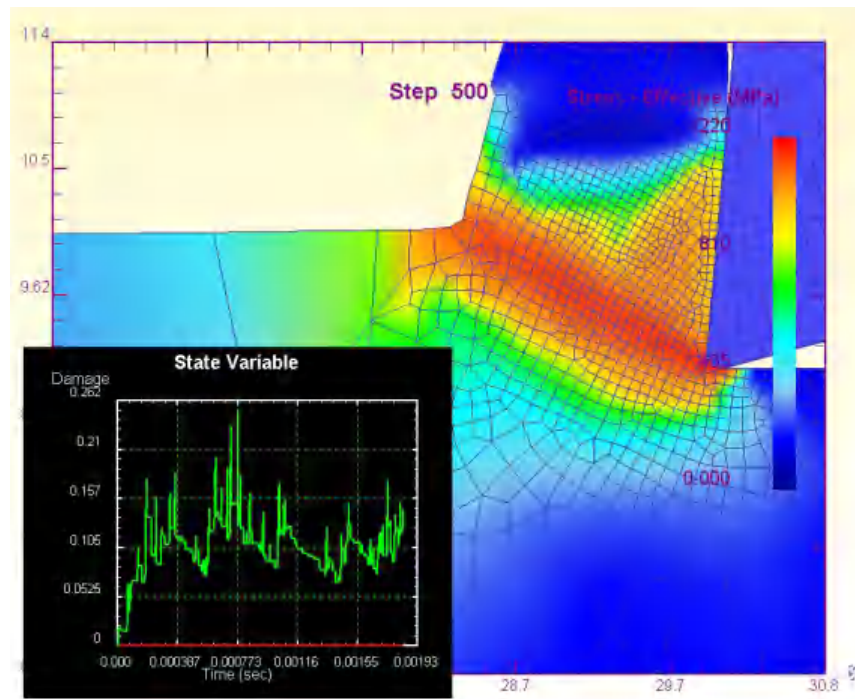


Рис.2.21. Графічна інтерпретація динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування МакКлінтока (метод оброблення – точіння, матеріал деталі – сталь 35; режими різання $t=1,0$ мм, $S=0,25$ мм; $V=150$ м/хв)

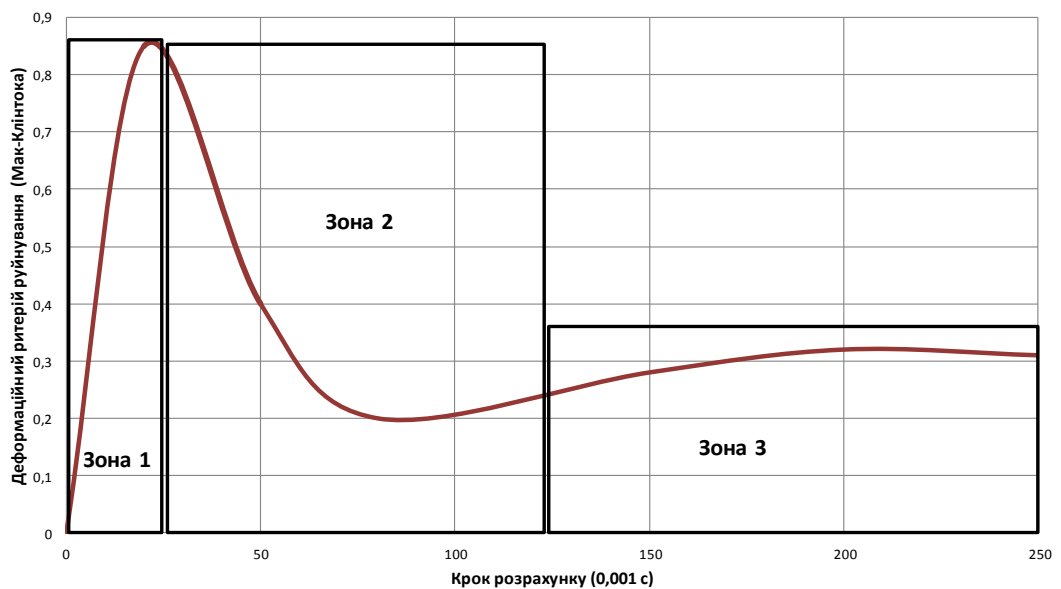


Рис.2.22. Графічна інтерпретація динаміки зміни деформаційного критерію руйнування в реологічній моделі різання

В цілому можна зробити висновок про те, що моделі різання з використанням деформаційних, силових та енергетичних критеріїв руйнування (методи Мак-Клінтока, Райса-Трейсі, Кокрофта-Лейтема) в цілому адекватно описують реологічну картину стружкоутворення при обробленні пластичних та квазікрихких матеріалів, адекватно реагують на зміну технологічних чинників (в даному випадку збільшення глибини різання з $t=0,2$ мм до $t=1$ мм відбулося зменшення чисельних значень цих критеріїв в 3-4 рази, що відповідає теоретичним розрахункам [272]).

Результати дослідження різнорідних критеріїв руйнування під час імітаційного моделювання процесу різання наведено в додатках А-Б.

Проаналізувавши результати імітаційного моделювання різання різнорідних матеріалів із застосуванням деформаційних, енергетичних та силових критеріїв руйнування (моделі Мак-Клінтока, Райса-Трейсі, Кокрофта-Лейтема), можна зробити такі висновки [66, 272]:

- з метою порівняльного аналізу різних моделей руйнування доцільно використання тільки нормалізованих критеріїв;
- при використанні деформаційних критеріїв руйнування (Мак-Клінтока) чітко спостерігається етапи динаміки його зміни (Рис. 2.22)– зростання (зона I), релаксація (зона II), стабілізація (зона III) – , що цілком відповідає теоретичним положенням теорії кінетики дислокацій [190]. Це обумовлено початковим різким зростанням об'єму критично-деформованого матеріалу (через випередження величини інтенсивності деформацій $\dot{\epsilon}$), подальшим його перерозподілом і усталеним перебігом процесу різання;
- згідно фізичного механізму різання за енергетичним критерієм, руйнування відбувається через розриви міжатомних зв'язків за допомогою теплового руху, енергетичні сплески якого перевищують енергію цих зв'язків. Роль зовнішнього навантаження - допоміжна, вона знижує енергію зв'язків та утримує розірвані зв'язку від рекомбінації. Тому при використанні енергетичних критеріїв (наприклад, Кокрофта-Лейтема) різкого зростання

критерію руйнування не спостерігається, що викликано врахуванням впливу температурних процесів, які частково анігілюють початковий спалах деформаційних явищ, особливо для пластичних матеріалів;

- враховуючи вищенаведені висновки та співставлення їх з теоретичними положеннями, можна рекомендувати для реологічних моделей різання пластичних матеріалів (сталі, дюралюміні, мідномісткі сплави) використання енергетичних критеріїв руйнування, а для різання умовно-крихких матеріалів (чавуни, силуміни тощо) – деформаційних критеріїв (через домінуючий чинник впливу інтенсивності деформацій і значних дислокаційних трансформацій на появу та розвиток мікротріщин, що покладено в основу теорії крихкого руйнування).

2.3. Методика імітаційного реологічного МСЕ моделювання процесу формоутворення деталей різанням.

В ході проектування функціонально-орієнтованого технологічного процесу дуже важливим етапом є адекватне моделювання формоутворення окремих поверхонь та виробу в цілому. Аналіз результатів такого моделювання дасть змогу встановити діючий та залишковий напружено-деформований стан деталі, що, в свою чергу, дозволить формалізувати прогностичну залежність найважливіших експлуатаційних характеристик виробу від структури та параметрів технологічного процесу його виготовлення. В даному сенсі важливою задачею є верифікація змодельованих термодинамічних процесів, що супроводжують формоутворення поверхонь, співставлення відомих положень теорії різання з результатами моделювання для їх подальшого опрацювання.

Процес різання пластичних ізоморфних матеріалів складається з двох етапів [248]: стиску деякого об'єму металу, що знаходиться під впливом силової дії інструментального клина, і наступного зсуву частини матеріалу заготовки у вигляді суцільного або фрагментарного сегменту. Напрямок деформацій всередині стружки відповідає напрямку ліній зсуву, по яких метал

заготовки деформується на стадії стиску. Після того, як напружено-деформований стан металу досягне порогового енергетичного чи деформаційного значення, відбувається його руйнування, що призводить до формоутворення окремого стружкового елемента. У цей момент відбувається зсув елементів стружки в площині BC (Рис.2.23). Причому пластична деформація поширюється в зоні, обмеженій кутом дії ψ . Відповідно кут β_1 стає кутом зсуву, а площина BC — площиною зсуву [273].

Цей процес характеризує руйнування пластичних або квазіпластичних матеріалів, що обробляються з великою товщиною зрізу і при малому передньому куті різального клину. Зсув відбувається в одній площині, а не в об'ємі. Аналіз імітаційних моделей різання, показав, що пластичні деформації відбуваються в сімействі площин віялоподібно, площини цих зрушень проходять через лезо інструменту, що підтверджує відому гіпотезу, висловлену проф. Н. Н. Зорєвим [141] (Рис.2.24)

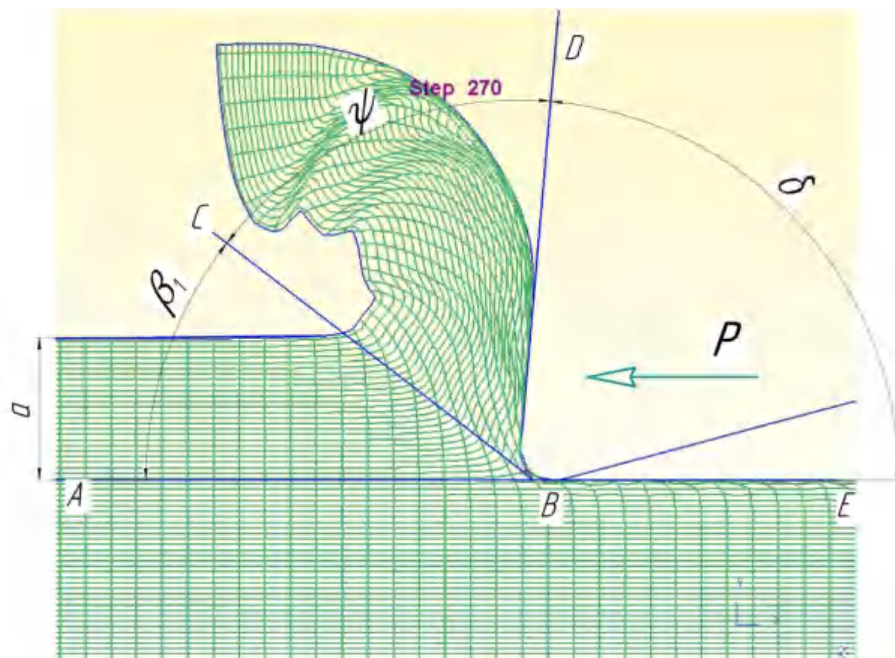


Рис.2.23. Схема формоутворення різанням

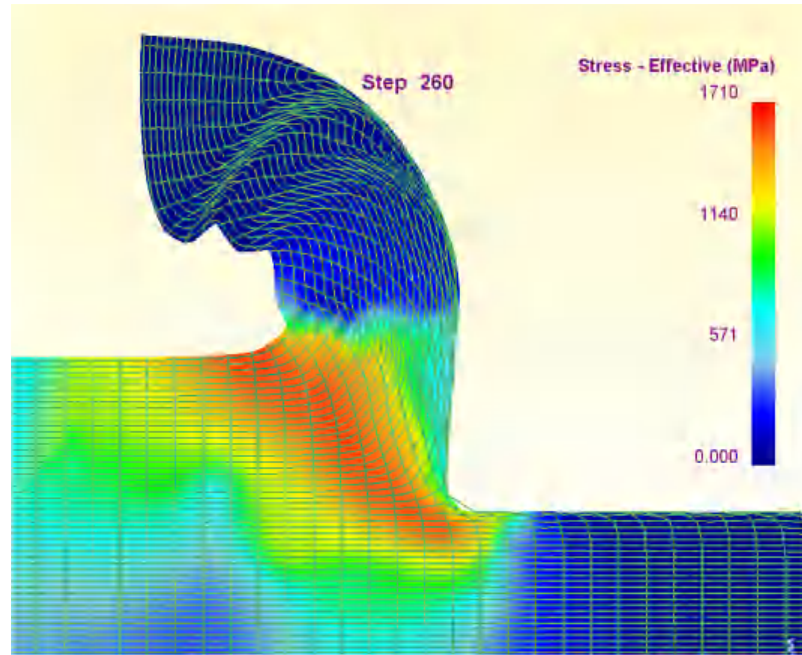


Рис.2.24. Реологічна картина розподілу еквівалентного напруження в зоні стружкоутворення.

Поверхня із слідом ВС — межа між металом у початковому стані і металом з суттєво вираженою деформацією. Метал, що знаходиться під обробленою поверхнею виходить пластично деформованим, тобто має місце наклеп поверхні, хоча міра деформації тут значно менша. Межа між деформованим металом утвореної стружки і основним металом заготовки проходить вздовж кривої лінії, яка для спрощення також може бути прийнята у вигляді ламаної лінії (Рис.2.25) . Зливна стружка є суцільною стрічкою, окремі елементи якої важко помітити. Проте цей процес якісно відображається у реологічній моделі з елементами моделювання деформованого стану лагранжевою сіткою (Рис.2.25). Шари металу, що ковзають по різцю, як би згинаються в напрямі, зворотному переміщенню стружки. Причина викривлення полягає в створенні значного тертя між стружкою і передньою поверхнею інструменту [273].

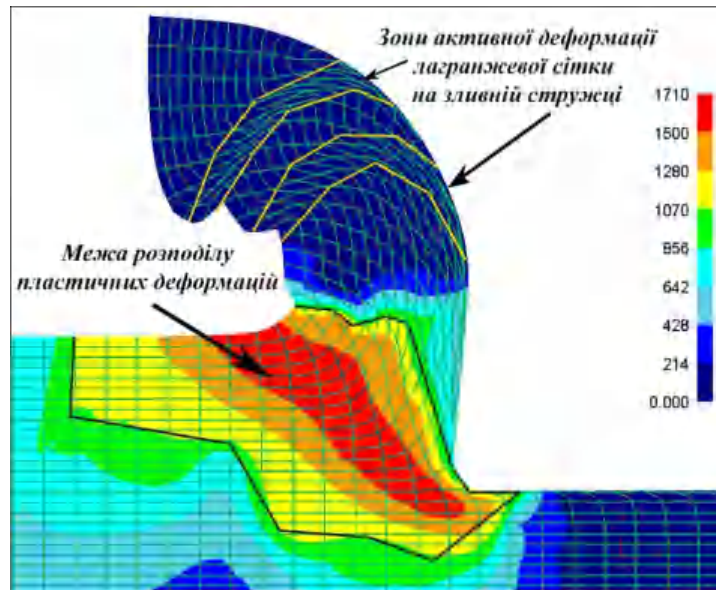


Рис.2.25. Межі деформаційних та пластичних зон в області зсуву

Таким чином, в стружці відзначаються два напрями пластичної деформації. Перший – в напрямку площини зсуву (Рис.2.26), другий - вздовж передньої поверхні різця (зона «вторинної» деформації). Ширина зони вторинної деформації невелика і складає менше 10% від товщини стружки [273].

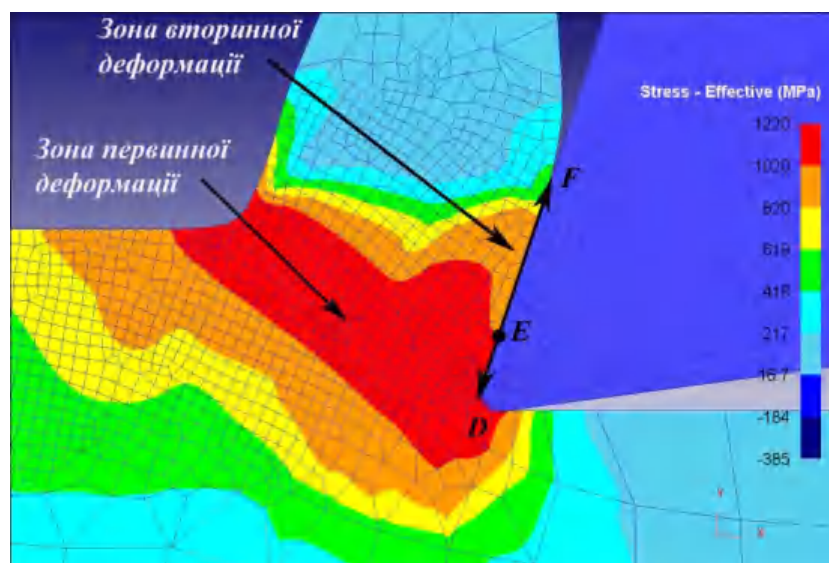


Рис.2.26. Зони деформації в області стружкоутворення

В результаті додаткової деформації матеріал стружки отримує значне

зміцнення. Твердість його зростає в 1,5...2 рази по відношенню до твердості початкового матеріалу: чим ближче до передньої поверхні, тим вище твердість. На деякій довжині відрізка $|DF|$ стружка контактує з інструментом, а потім відхиляється від нього і завивається. При збільшенні швидкості різання радіус завивання стружки збільшується, що доведено великою кількістю імітаційних моделей та рядом експериментальних даних [82, 94, 102, 111, 170, 263].

Аналізуючи контактні процеси на передній поверхні різального клина, можна зробити такі висновки (Рис.2.26):

а) на передній поверхні інструмента на довжині $DF=l$, формуються дві зони (Рис.2.26): зона пластичного контакту довжиною $DE=l_1$ і зона пружного контакту $EF=l_2$. На ділянці l_1 (пластичного контакту) розташовується загальмований шар матеріалу, в межах якого стружка рухається не по передній поверхні, а по цьому загальмованому шарі і опір руху стружки визначається величиною опору зсуву в контактному шарі стружки. На цій ділянці зовнішнє тертя ковзання відсутнє і замінюється «внутрішнім» тертям між окремими шарами стружки. На ділянці l_2 стружка контактує безпосередньо з передньою поверхнею інструмента. Тут відбувається зовнішнє тертя ковзання і величина опору руху стружки визначається силою тертя між стружкою та передньою поверхнею. Довжина ділянки пластичного контакту l_1 залежить від переднього кута інструмента, товщини зрізаного шару і коефіцієнта усадки стружки. Причому аналіз великої кількості імітаційних реологічних моделей доводить, що $l_2 \approx 0,5l_1$. Ця залежність підтверджується численними теоретичними та експериментальними дослідженнями [94, 327].

Для матеріалів, що характеризуються високою мірою анізотропії пружних і міцнісних властивостей, вплив застосування різних критеріїв руйнування матеріалів на результати розрахунків в першу чергу залежить від інтенсивності деформації $\dot{\epsilon}$. Як показали чисельні розрахунки та аналіз результатів імітаційного моделювання в системах Deform 2D(3D), ABAQUS, Advantedge, LS Dyna [11, 12, 83, 174, 175, 272, 274, 275], саме вибір критерію руйнування

істотно впливає на процес руйнування. Врахування різних характеристик матеріалу в зоні стружкоутворення при розтягуванні і стисканні дозволяє адекватніше моделювати процес різання, але збільшення кількості незалежних міцнісних характеристик пред'являє більш високі вимоги до адекватності поправочних коефіцієнтів, визначених на основі експериментальних даних.

На Рис.2.27 наведена реологічна картина зон стиску та розтягу при різанні заготовки з конструкційної сталі 45 ($S=0,25\text{мм}$; $t=1\text{ мм}$; $V=120\text{ м/хв}$).

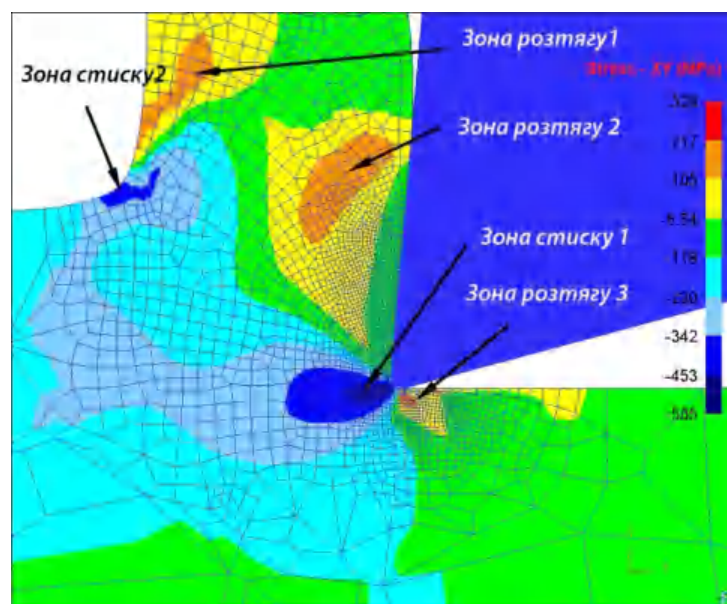


Рис.2.27. Реологічна картина розподілу зон напруження під час оброблення заготовки зі сталі 45 ($S=0,25\text{мм}$; $t=1\text{ мм}$; $V=120\text{ м/хв}$)

Очевидно, що в області контакту заготовки з передньою поверхнею леза інструменту і в місці її затискання біля вершини леза виникає стискання матеріалу заготовки (зона стиску 1), аналогічна картина стиску спостерігається з протилежного боку стружкоутворення (зона стиску 2). Причому напруження в зоні стиску 1 ($\tau_{xy} \approx 560\text{ МПа}$) набагато інтенсивніші від напружень в зоні стиску 2 ($\tau_{xy} \approx 400\text{ МПа}$). В результаті енергетичного балансу, формуються також області розтягу в зоні зовнішнього стружкоутворення (зона розтягу 1), в зоні, що межує з областю вторинних деформацій – близько передньої поверхні різального клина (зона розтягу 2) та в зоні, що наближена до задньої поверхні

інструменту (зона розтягу 3). Причому, якщо площа та інтенсивність деформацій в зонах розтягу 1 і 2 приблизно однакові ($\tau_{xy} \approx 180...200$ МПа), то інтенсивність напружень в зоні 3 є вищою ($\tau_{xy} \approx 300$ МПа), але більш локальною. В даному випадку значення та розподіл зон напруженості суттєво впливає на характер та геометрію стружкового елемента. Крім того, інтенсивність та локалізація зон стиску 1 і розтягу 3 формує залишкові напруження та деформації на обробленій поверхні заготовки.

В моделях формування вібраційної складової мікротопології поверхонь, важливим є аналіз реологічна картина розподілу деформацій при утворенні зубчастоподібної стружки, що утворюється, наприклад під час оброблення титанових сплавів (Рис.2.28). При цьому з'являються області надмірно локалізованої пластичної деформації, так звані полоси адіабатичного зсуву [82, 282].

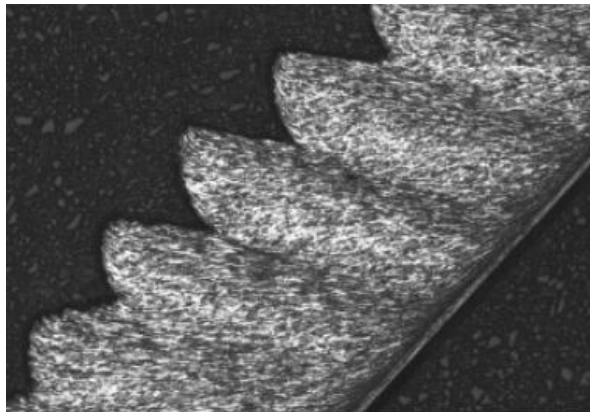


Рис.2.28. Зубчастоподібна форма стружки при обробленні титанового сплаву ВТ6 у макроскопічному збільшенні.

Матеріал оброблюваної заготовки в зоні зсуву приходить в пластичний стан під дією дотичних, згинних та нормальних навантажень. Розглядаючи плоский напружений стан в зоні зсуву, умова пластичності може бути виражена у величинах дотичного $\tau(t)$ і нормального $\sigma(t)$ напружень. У відповідності до 4

теорії міцності (критерій Мізеса), еквівалентні напруження в зоні стружкоутворення дорівнюють:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{[\sigma(t)]^2 + 3[\tau(t)]^2} \quad (2.16)$$

Напруження $\sigma(t)$ і $\tau(t)$ залежать від часу t . Виходячи з енергетичного обґрунтування теорії Мізеса-Генкі [230], по мірі зменшення величини дотичного напруження $\tau(t)$ збільшується величина $\sigma(t)$, якщо матеріал залишається в пластичному стані, як це витікає з рівняння (2.16). Згідно експериментальних досліджень проф. Альбрехта [82] в якусь мить часу попереду різця може спостерігатися суто пластичний стиск, при цьому напруження зсуву практично дорівнює нулю і кут зсуву має значну величину (Рис.2.29(а)). На цій стадії метал перестає переміщатися вздовж різця і переходить в стружку, а починає текти в поперечному напрямі, як при стиску зразка. Матеріал на передній грані різця тимчасово залишатиметься нерухомим (Рис.2.29(в)). Пластичний стиск відбувається протягом дуже короткого проміжку часу (для наведеного прикладу – 0,0002 с). Пластична зона в цих умовах охоплює велику область і швидко поширюється вперед перед різцем. Напруження зсуву уздовж нижньої межі збільшується, досягає граничної величини, починається процес пластичного зсуву (Рис.2.29(б)).

На стадії пластичного стиску (без переміщення металу по передній поверхні різця) коефіцієнт тертя між деформованим металом і різцем дуже високий. Він може бути приблизно рівним за величиною коефіцієнту статичного тертя. Протягом наростання сили зсуву знову починається переміщення металу по передній поверхні різця і коефіцієнт тертя зменшуватиметься, що, у свою чергу, викличе збільшення кута зсуву і зменшення дотичних напружень. Орієнтація площини зсуву відносно результуючої сили буде такою, що дотичні напруження стануть менше межі текучості і характер деформації знову представлятиме один з видів стиску, повторюючи цикл [274, 282].

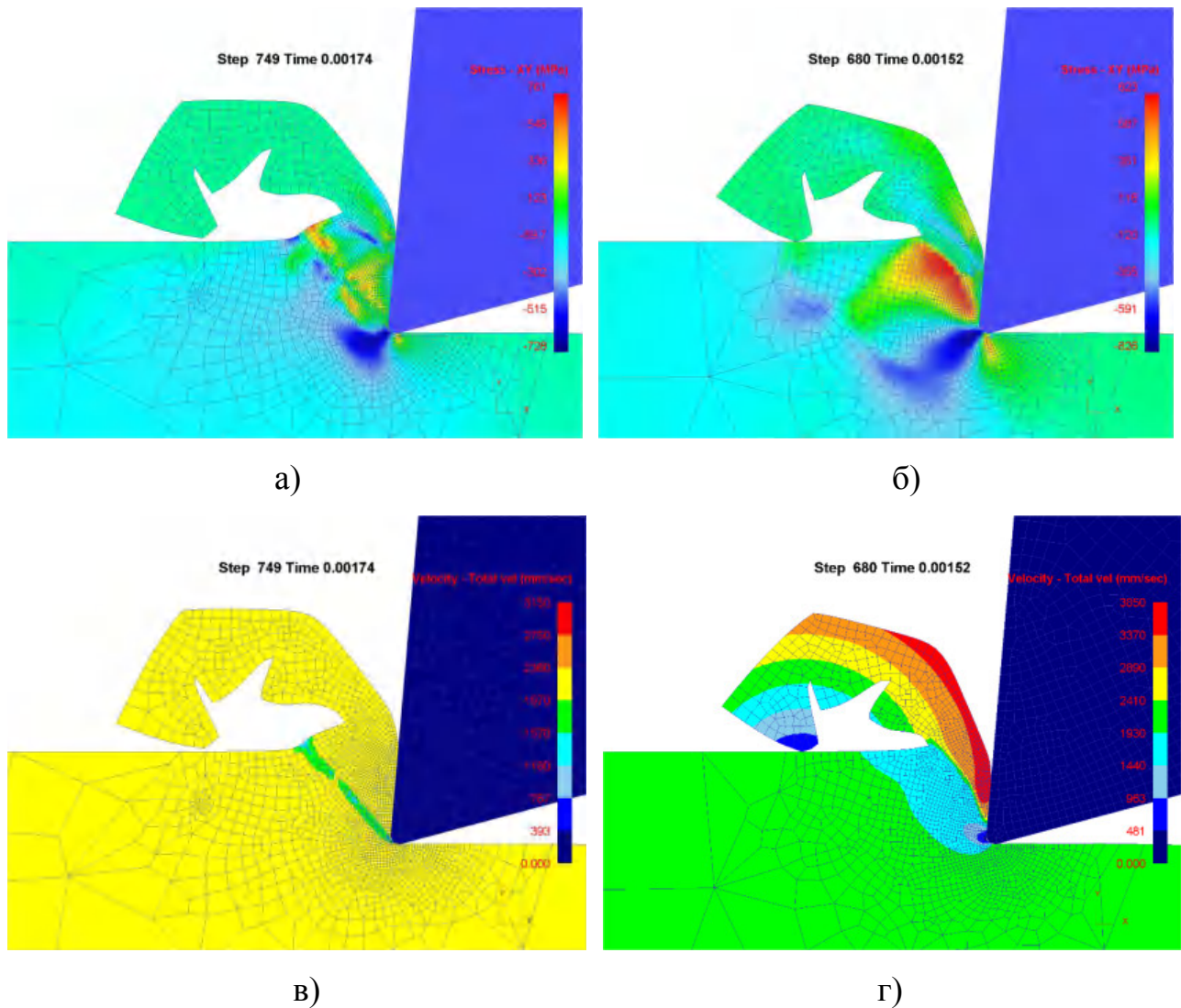


Рис.2.29. Динаміка формування стружки адіабатичного зсуву

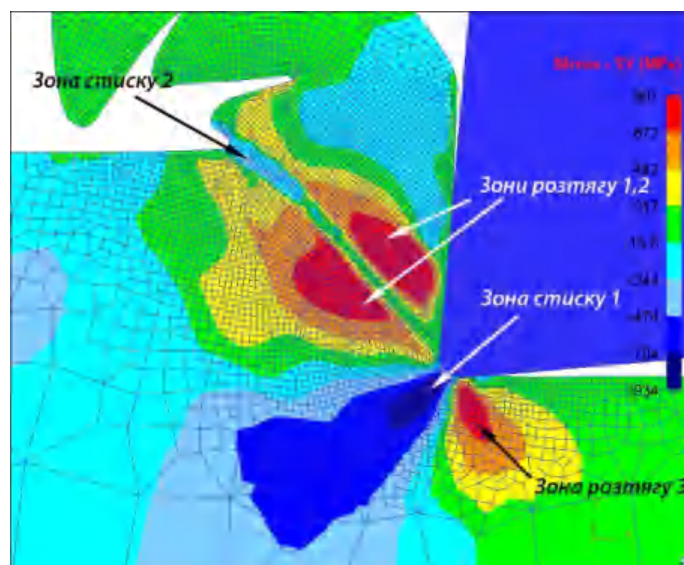


Рис.2.30. Реологічна картина розподілу зон напруження під час оброблення заготовки з титанового сплаву ВТ6 ($S=0,4\text{мм}$; $t=1\text{ мм}$; $V=150\text{ м/хв}$)

Якщо розташування зони стиску 1 ($\tau_{xy} \approx 930$ МПа) є аналогічним, як і для випадку формоутворення зливної стружки (Рис.2.30), то зона стиску 2 є набагато об'ємніша та має вигляд гострого клина, спрямованого вздовж площини зсуву ($\tau_{xy} \approx 250$ МПа) – Рис.2.30. Ця зона розділяє дві практично однакові за значенням та площею об'ємні та інтенсивні зони розтягу 1 і 2 ($\tau_{xy} \approx 700...900$ МПа). Очевидно, що і зона розтягу 3, що впливає на формування залишкових деформацій є об'ємнішою та інтенсивнішою ($\tau_{xy} \approx 800$ МПа).

З метою аналізу напружено-деформованого стану заготовки в зоні стружкоутворення була побудована та реалізована в системі Deform 2D реологічна імітаційна модель, що дозволила більш детально розглянути також динамічні процеси формоутворення стружки та поширення впливу силових та енергетичних чинників процесу різання, дослідити вплив технологічних показників (глибини різання, подачі, швидкості різання, геометричних параметрів різального клина тощо) на формування стружки та стан обробленої поверхні.

В імітаційній реологічній моделі зона розподілу інтенсивності деформацій розділена адаптивною градієнтною сіткою з меншою густиною в області інтенсивних деформаційних процесів. Найменше значення густини сітки (зона контакту передньої поверхні різального клина до заготовки) становить 0,01 мм, густина концентрації сітки - 25%. Потім ця ж сітка переноситься на графічно представлені результати розрахунку. Внаслідок цього можна для будь-якої області, обкресленою вибраним осередком, встановити значення ефективного та еквівалентного напруження ($\bar{\sigma}, \sigma_{\max}$), деформацій (ε), швидкості поширення деформацій ($\dot{\varepsilon}$), температури T тощо.

В області стружкоутворення можна окреслити 3 зони поширення деформаційних явищ. Зона I знаходиться на вершині різального клину і характеризується значними стискуючими деформаціями. Протилежна їй зона

III має також пікові показники напруження, які викликані інтенсивною зміною геометрії поверхневого шару заготовки внаслідок накладення зсувних та згинальних деформацій. Зона II є проміжною ланкою, що інтерферентно та локально поширює деформації вздовж площини зсуву. Зони I і III характеризуються неврівноваженістю напруженого стану. Вони збільшуються по мірі зростання навантаження. Напруження в зоні II, в основному, рівномірне. По мірі наближення пластичної області в район умовної площини зсуву до стану пластичного «шарніра» зони I і III зближуються за рахунок зменшення зони II [277, 279]. Таблиця основних характеристик напружено деформованого стану наведена додатку В.

Критерії міцності по умовній площині зсуву повністю відповідають доведеній гіпотезі про взаємодію при різанні робіт стискання і згину [248]. Біля різальної кромки запас пластичності для цієї розрахункової схеми вичерпаний в найбільшій мірі. Очевидним є зростання критерію руйнування при наближенні до місця «затискання» стружки-консолі в зоні стиску III [272].

Імітаційне моделювання реологічного стану заготовки в процесі різання дозволяє встановити цілий ряд важливих технологічних параметрів, які іншим шляхом встановити важко або неможливо. Зокрема, безпосереднім виміром моделі може бути встановлена товщина стружки в пластичній зоні. Наприклад, безпосереднім виміром отримана довжина лінії зрізу $L=1,83$ мм на Рис.2.33. Для формування бази даних функціонально-орієнтованого технологічного процесу важливим є також встановлення динамічних характеристик сил різання, зміни кута зсуву, інтенсивності релаксації зони напружено-деформованого та термодинамічного стану обробленої поверхні.

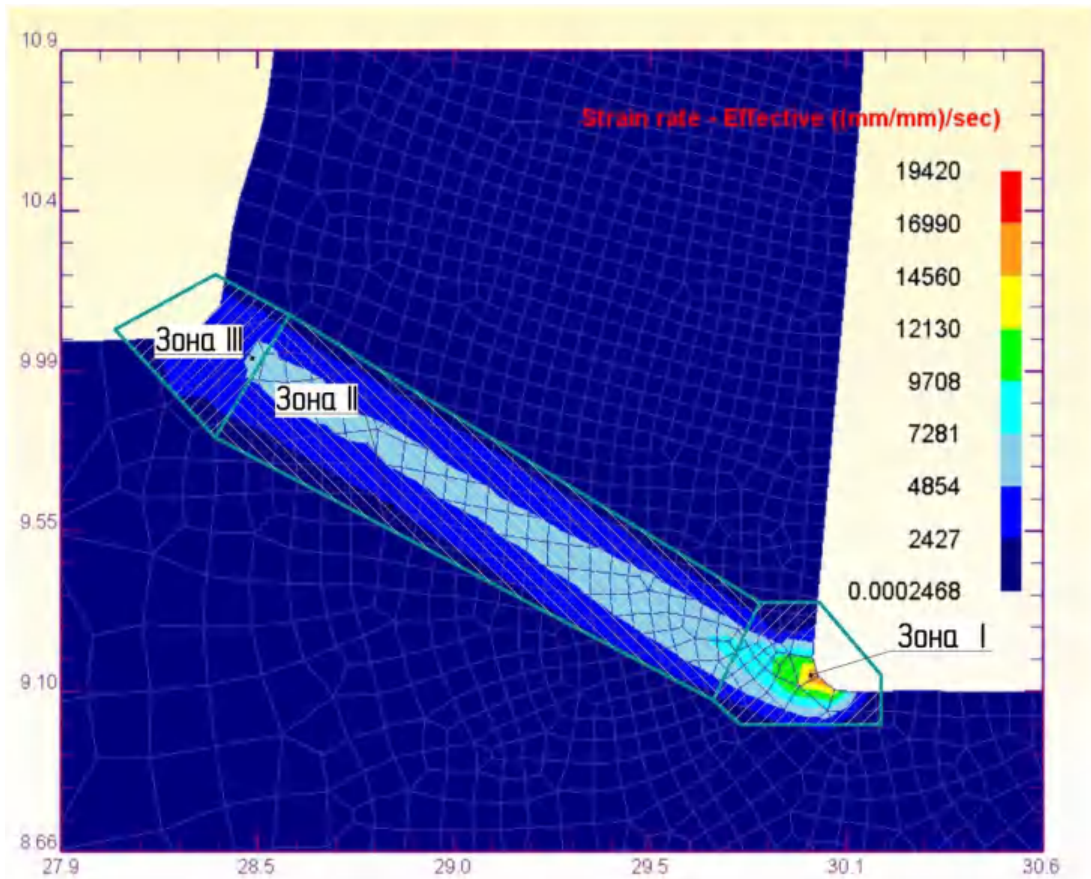


Рис.2.31. Зони розподілу в інтенсивності деформацій в області зсуву стружки

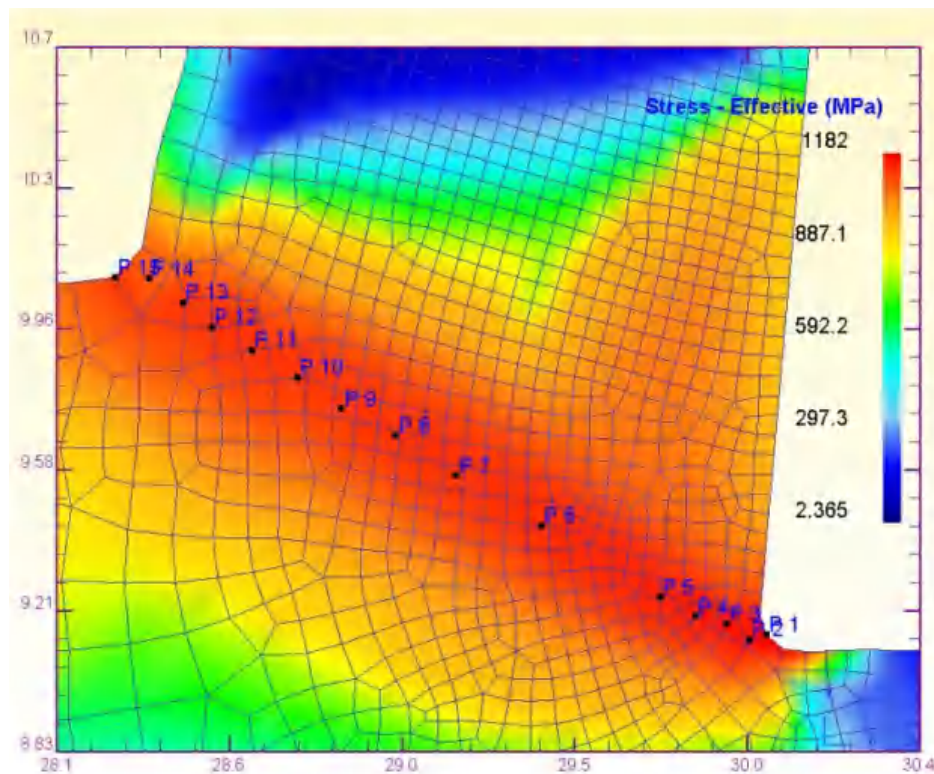


Рис.2.32. Аналіз деформаційних, силових та температурних характеристик вздовж площини зсуву стружки

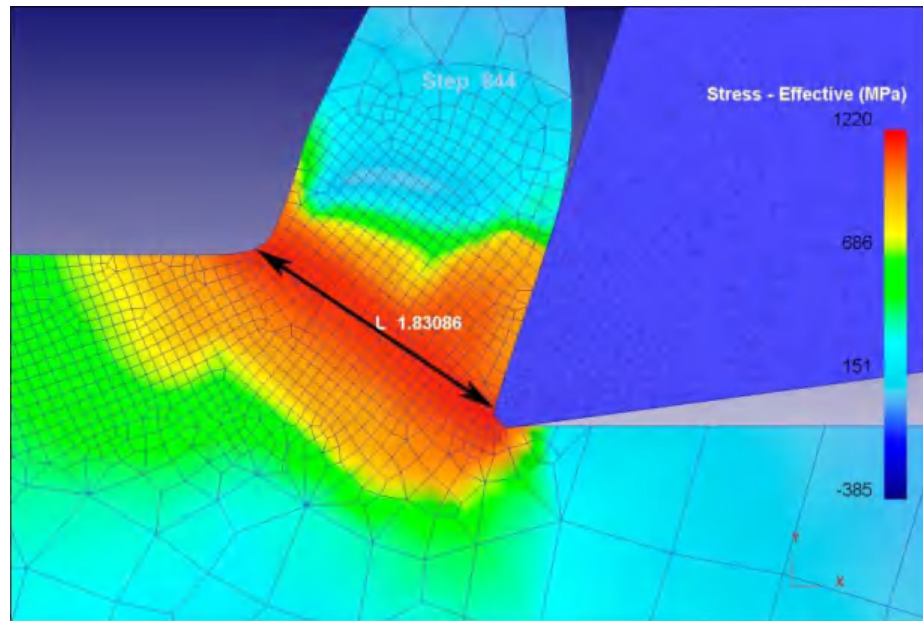


Рис.2.33. Приклад визначення товщини стружки в зоні зсуву.

Отже, в результаті імітаційного моделювання реологічного стану заготовки при різанні встановлені закономірності зміни напружено-деформованого стану зони різання і питомої роботи стружкоутворення, інваріантні в широких інтервалах зміни умов та режимів оброблення, що може стати теоретичною основою механіки процесу різання металів з ізоморфними механічними властивостями. Отримані аналітичні залежності та практичні рекомендації можуть слугувати теоретичним апаратом для кількісного аналізу внутрішніх взаємозв'язків і чинників, що визначають ефективність відповідного методу оброблення як засіб підвищення оброблюваності матеріалів різанням, а також можуть знайти застосування при створенні інших методів обробки, що використовують додаткові види механічної дії на матеріал.

2.4. Висновки розділу 2.

1. Методологія функціонально-орієнтованого проектування базується на системі паралельного інжинірингу (Concurrent engineering)). Засобами паралельного інжинірингу можна реалізувати рекурентний і ітераційний взаємозв'язок крос-функціональних етапів технологічної підготовки виробництва: 3D моделювання виробів (CAD-система), імітації умов їх подальшої експлуатації (CAE-система), проектування структури і параметрів технології їх виготовлення (CAPP-система) і програмування механічної обробки на верстатах з ЧПК (CAM-система). Особливістю впровадження функціонально-орієнтованих технологій для ефективною реалізації методології PLM в машинобудуванні на основі принципу паралельного проектування є використання CAF-системи (Computer Aided Forming). У основі цієї системи покладений аналіз реологічної імітаційної моделі окремих технологічних переходів і комплекс функціональних модулів і аналітичних додатків формування точнісних, термодформаційних, мікрогеометричних і структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

2. Методика побудови функціонально-орієнтованого технологічного процесу та структура задач передбачає: адекватне імітаційне моделювання напружено-деформованого стану деталей в процесі їх формоутворення; розроблення комплексу функціональних модулів та аналітично-прикладних програм формування точнісних, термічно-деформаційних, мікрогеометричних та структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь; формалізацію прогностичних зв'язків між структурою та параметрами технологічного процесу оброблення деталей та домінуючими експлуатаційними властивостями деталей; структурно-параметрична оптимізацію функціонально-орієнтованого технологічного процесу та розроблення алгоритму розрахунку інтегрального кваліметричного показника, який системно характеризує функціональні властивості навантажених поверхонь виробу і отримується як результат

формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій.

3. Пластична деформація, що передує руйнуванню, визначається рухом дислокацій в зоні пластичних деформацій (для процесів різання – в зоні стружкоутворення). Очевидно, що в цьому випадку густина дислокацій є тензорною величиною. Для опису руху суцільного середовища методом МСЕ аналізу використовують різні конфігурації розрахункових сіток. Стационарні ейлерові сіткові лінії, як правило, залишаються незмінними впродовж усього процесу розрахунку. Такий підхід добре зарекомендував себе при реологічному моделюванні статичних середовищ, в яких чітко зафіксовані або взагалі відсутні межі розподілу силової дії об'єктів моделювання. Проте, моделюючи процеси різання, ми маємо справу з динамікою дислокаційних зон, де вище описаний підхід є повністю неприйнятний, оскільки сіткові лінії не можуть бути фіксованими, а повинні адаптуватися під положення меж, що змінюються в часі в результаті утворення стружки, деформацій інструмента та заготовки тощо. В зв'язку з цим є доцільним використання методів розрахунку динаміки суцільного середовища за допомогою адаптивної лагранжевої сітки.

5. Важливим етапом методики дослідження напружено-деформованого стану деталі в процесі її формоутворення є правильний вибір найбільш ефективного формату вирішувача МСЕ аналізу (в т.ч. для матриць нерегулярної структури) – Sparse або Skyline. З досвіду вирішення аналогічних задач можна зробити висновок, що вирішувач сполучених градієнтів Skyline (Conjugate Gradient) працює швидко і вимагає менше пам'яті, ніж вирішувач розріджених матриць Sparse. Однак з ітераційним вирішувачів він має труднощі зі збіжності рішення у випадку з недостатньою кількістю точок контакту. Було встановлено, що, наприклад, при моделюванні процесу різання з малою глибиною, як тільки в контакті виявляється невелика кількість вузлів, то трапляються труднощі зі збіжністю. Але для задач з великою кількістю тетраелементів (чотирихвизлові лагранжеві ґратки) вирішувач розріджених матриць Sparse іноді вимагає

більшої пам'яті, ніж може виділити комп'ютер, і тому розрахунок може зупинитися без попереджувального повідомлення. Експериментально встановлено, що для вирішувача Sparse максимальна межа складає 140 тис. елементів.

5. Деформований стан металу, що перейшов в стружку, може бути наслідком накладення на деформацію простого зсуву (зсув в перехідній зоні, що пластично деформується), неоднорідної деформації двовісного стиску (чистого зсуву) і вторинної неоднорідної зсувної деформації паралельно передньої грані інструменту. Неоднорідні компоненти деформації обумовлюють появу в різних рівнях перерізу стружки різниці в швидкостях руху. Звичайне прискорення руху внаслідок деформації стиску переважає, і стружка після виходу з контакту завивається. Вторинна зсувна деформація стружки зменшує її завивання, а якщо сила тертя на передній поверхні суттєво зростає, то внаслідок цього посилення вторинної зсувної деформації призводить до збільшення радіусу завивання стружки – аж до її випрямлення. Це обумовлено відносно низькою густиною дислокацій, яка недостатня, щоб забезпечити можливість якого-небудь виду руху усередині металу. Адже дислокації роблять структуру металу більше розрідженою і внутрішньо напруженою. Метал стає більш текучим і по ряду властивостей наближається до рідкого стану. Тому моделювання процесу руйнування матеріалу заготовки і формоутворення деталі методом скінчених елементів можна вважати реологічним моделюванням. Матеріал заготовки в зоні стружкоутворення проявляє одночасно пластичні (в'язкісні) та пружні властивості. Причому, вкрай важливо, що реологія розглядає діючі на деталь в процесі її оброблення напруження і викликані цією дією деформації як зворотні (пружні), так і незворотні (залишкові). Таким чином, ми можемо розглядати взаємозв'язок генерованих процесом різання короткочасних напружень в зоні різання з залишковими напруженнями та деформаціями, що визначатимуть в

майбутньому якості експлуатації об'єкта виробництва, що і є основою побудови функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

6. Для побудови адекватної реологічної моделі різання важливим етапом є правильний вибір критерію руйнування матеріалу заготовки. Проаналізувавши результати імітаційного моделювання різання різнорідних матеріалів із застосуванням деформаційних, енергетичних та силових критеріїв руйнування (моделі Мак-Клінтока, Райса-Трейсі, Кокрофта-Лейтема), можна зробити такі висновки: з метою порівняльного аналізу різних моделей руйнування доцільно використання тільки нормалізованих критеріїв; при використанні деформаційних критеріїв руйнування (Мак-Клінтока) чітко спостерігається етапи динаміки його зміни – зростання, релаксація, стабілізація, що цілком відповідає теоретичним положенням теорії кінетики дислокацій. Це обумовлено початковим різким зростанням об'єму критично-деформованого матеріалу (через випередження величини інтенсивності деформацій $\dot{\epsilon}$), подальшим його перерозподілом і усталеним перебігом процесу різання; згідно фізичного механізму різання за енергетичним критерієм, руйнування відбувається через розриви міжатомних зв'язків за допомогою теплового руху, енергетичні сплески якого перевищують енергію цих зв'язків. Роль зовнішнього навантаження - допоміжна, вона знижує енергію зв'язків та утримує розірвані зв'язку від рекомбінації. Тому при використанні енергетичних критеріїв (наприклад, Кокрофта-Лейтема) різкого зростання критерію руйнування не спостерігається, що викликано домінуючим впливом температурних процесів, які частково аніглюють початковий спалах деформаційних явищ, особливо для пластичних матеріалів. Враховуючи вищенаведені висновки та співставлення їх з теоретичними положеннями, можна рекомендувати для реологічних моделей різання пластичних матеріалів (сталі, дюралюміні, мідномісткі сплави) використання енергетичних критеріїв руйнування, а для різання умовно-крихких матеріалів (чавуни, силуміни тощо) – деформаційних критеріїв (через домінуючий чинник впливу інтенсивності

деформацій і значних дислокаційних трансформацій на появу та розвиток мікротріщин, що покладено в основу теорії крихкого руйнування).

7. Аналіз результатів реологічного імітаційного моделювання процесів різання дасть змогу встановити діючий та залишковий напружено-деформований стан деталі в процесі її формоутворення. Аналізуючи контактні процеси на передній поверхні різального клина, можна зробити такі висновки : на передній поверхні інструмента можна прослідкувати формування 2-х зон - зони пластичного і зони пружного контакту. На ділянці пластичного контакту розташовується загальмований шар матеріалу, в межах якого стружка рухається не по передній поверхні, а по цьому загальмованому шарі і опір руху стружки визначається величиною опору зсуву в контактному шарі стружки. На цій ділянці зовнішнє тертя ковзання відсутнє і замінюється «внутрішнім» тертям між окремими шарами стружки.

8. В результаті реологічного моделювання процесів різання конструкційних сталей доведено, що, відношення довжини контакту стружки з інструментом до товщини зрізу є функцією переднього кута γ і усадки стружки. За умови збільшення товщини зрізу a зростає усадка стружки ξ і це спричинює вплив глибини різання на довжину контакту l в ступені, менше одиниці. При постійному значенні усадки стружки ξ довжина контакту l зростає прямо пропорційно товщини зрізу. Аналіз отриманих результатів моделювання свідчить про їх адекватність реальним процесам, що здійснюються під час формоутворення деталей різанням. Отримані аналітичні залежності можуть слугувати теоретичним апаратом для кількісного аналізу внутрішніх взаємозв'язків і чинників, що визначають ефективність реалізації відповідного методу оброблення, а також встановити діючий та залишковий напружено-деформований стан деталі, що, в свою чергу, дозволить формалізувати прогностичну залежність найважливіших експлуатаційних характеристик виробу від структури та параметрів технологічного процесу його виготовлення.

РОЗДІЛ 3.
МЕТОДОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЕРЕХОДІВ
ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ В САФ-СИСТЕМІ
(Computer Aided Forming System)

3.1. Аналіз впливу силових чинників технологічних переходів механічного оброблення деталей на напружено-деформований стан заготовки в зоні формоутворення методом скінчених елементів

Для аналізу впливу дії силових чинників формоутворення, інтенсивності вібраційних процесів інструменту та деталі, що формують показники точності та якості різання, спричинюють пластичні та пружно-пластичні деформації оброблюваного шару заготовки необхідно знати величину та динамічний розподіл цих сил. Дослідження, що проводяться в області динаміки різання, можна здійснювати 2-ма методами: 1) аналітичний розв'язок системи рівнянь для розрахунку сил різання на основі аналізу процесу руйнування як часткового випадку процесу пластичної деформації (зсуву); 2) визначення сил різання на основі імітаційного реологічного моделювання в системі, що реалізує метод скінчених елементів. Причому остатній вид дослідження здійснюється не тільки з метою встановлення адекватності теоретичних основ формоутворення оброблюваних поверхонь, але, в основному, для ефективного аналізу динамічного напружено-деформованого стану заготовки та інструменту в різних областях зони стружкоутворення, при різних крайових умовах моделювання (геометрія інструменту, матеріали, режими різання тощо) для подальшого використання в оптимізаційних моделях, що використовуватимуться для реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

Розглянемо систему сил, що діють при ортогональній схемі різання (Рис.3.1) [279]. Сумарна сила визначається на основі векторної суми сил внутрішнього тертя F_1 , направленої вздовж передньої поверхні інструментального клина і сили різання R , визначеної в напрямку подачі. Оскільки результуюча сила може змінювати напрямок дії, найкраще виражати її через векторну суму тангенціальної сили P_z і перпендикулярної до неї радіальної сили P_y .

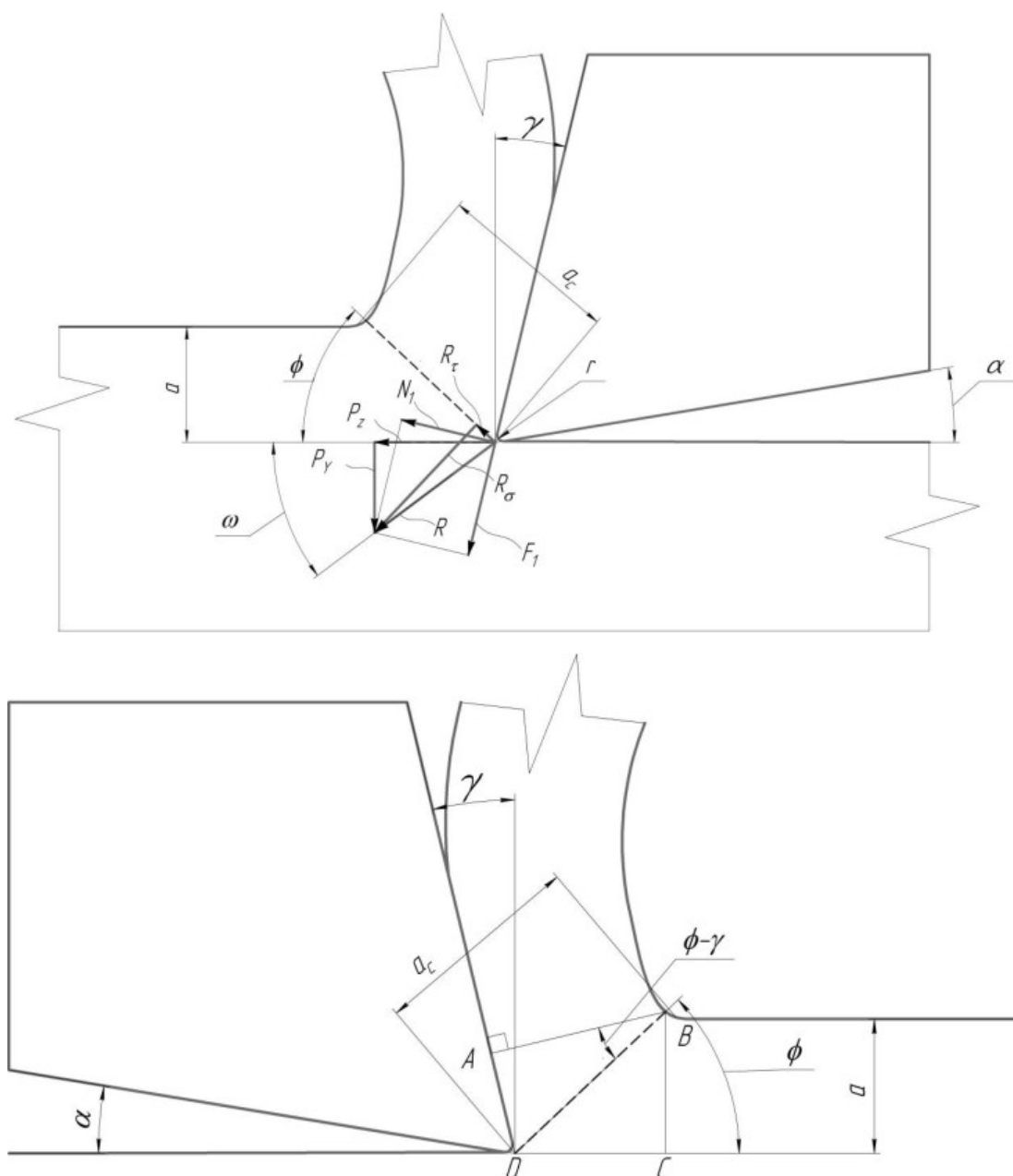


Рис.3.1. Схема силової взаємодії заготовки і інструмента в зоні стружкоутворення

Ці сили визначаються за формулами [221]:

$$P_z = \frac{a \cdot a_c \cdot \tau \cdot \cos \omega}{\sin \phi \cos(\phi + \omega)} \quad (3.1)$$

$$P_y = \frac{a \cdot a_c \cdot \tau \cdot \sin \omega}{\sin \phi \cos(\phi + \omega)} \quad (3.2)$$

де τ - дотичне напруження в площині зсуву (рис.3.1);

ϕ - кут зсуву;

a , a_c - товщина зрізу і стружки, відповідно;

ω - кут дії між результуючою силою і напрямом подачі.

Сили різання в площині зсуву описуються формулами:

$$\begin{aligned} R_{\tau} &= P_z \cdot \cos \phi - P_y \cdot \sin \phi \\ N_1 &= P_y \cdot \cos \phi + P_z \cdot \sin \phi \end{aligned} \quad (3.3)$$

Сили тертя на передній поверхні різального клина:

$$\begin{aligned} F_1 &= P_z \cdot \sin \gamma + P_y \cdot \cos \gamma \\ N_1 &= P_z \cdot \cos \gamma - P_y \cdot \sin \gamma \end{aligned} \quad (3.4)$$

Узагальнений коефіцієнт тертя :

$$\mu = \frac{F_1}{N_1} = \frac{P_z \cdot \sin \gamma + P_y \cdot \cos \gamma}{P_z \cdot \cos \gamma - P_y \cdot \sin \gamma} = \frac{P_z + P_y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{P_z - P_y \cdot \operatorname{tg} \gamma} \quad (3.5)$$

Усадка стружки:

$$\xi = \operatorname{ctg} \phi \cdot \cos \gamma + \sin \gamma \quad (3.6)$$

Тоді кут зсуву може бути визначений як:

$$\phi = \operatorname{arccctg} \left(\frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \right)$$

Тоді дотичні і нормальні напруження можуть бути визначені як:

$$\left\{ \begin{aligned} \tau &= \frac{(P_z \cos \phi - P_y \sin \phi) \sin \phi}{a \cdot a_c} \\ \sigma &= \frac{(P_z \sin \phi - P_y \cos \phi) \sin \phi}{a \cdot a_c} \end{aligned} \right. \quad (3.7)$$

Швидкість руху стружки по передній поверхні різального клина визначатиметься за формулою [221]:

$$V_c = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} V_w = \frac{V_w}{\xi} \quad (3.8)$$

Величина деформацій в зоні зсуву (рис.3.1):

$$\varepsilon = \frac{AD}{CD} + \frac{DB}{CD} = \operatorname{tg}(\phi - \gamma) + \operatorname{ctg}(\phi) \quad (3.9)$$

Інтенсивність зміни деформацій - $\dot{\varepsilon}$ (*strain rate*), що має домінуючий вплив на формування критерію руйнування при різанні:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\cos \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot \frac{V_w}{\Delta y} \quad (3.10)$$

де Δy – поперечний розмір зони зсуву, що підлягає пластичній деформації.

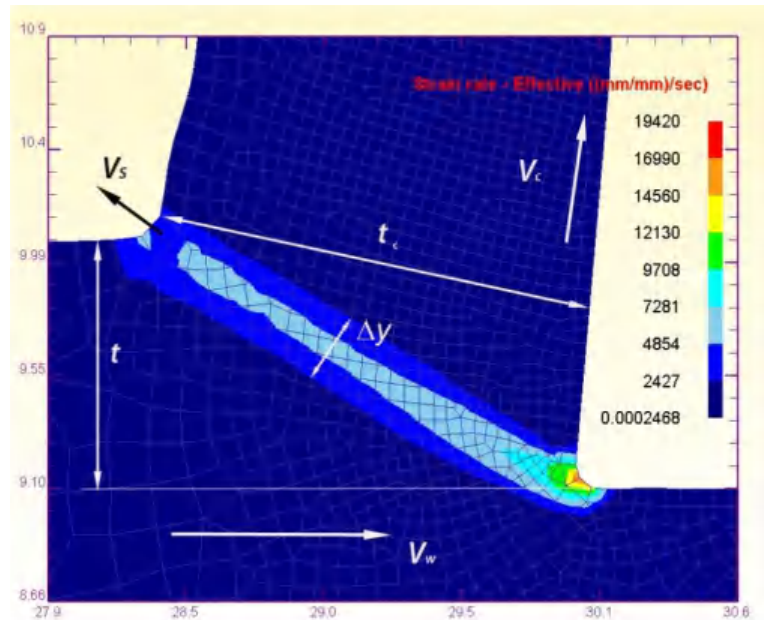


Рис.3.2. Схема для визначення деформацій в зоні зсуву

Для аналізу адекватності теоретичних розрахунків та даних реологічної моделі, проведемо аналіз даних за результатами дослідження імітаційної моделі різання сталі 45, подача $S=0,4$ мм; глибина різання $t=0,5$ мм, швидкість різання $V = 120$ м/хв [279]. Виберемо довільну точку в межах площини зсуву – P1 (рис.3.4.). Передній кут різального клина становить $\gamma=5^\circ$. Аналіз геометрії площини зсуву, дозволяє визначити кут зсуву $\phi \approx 35^\circ$. Тоді деформації в точці P1 визначатимуться за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \operatorname{tg}(35-5) + \operatorname{ctg}(35) = 1,97 \text{ мм/мм}$$

За даними реологічної імітаційної моделі деформації в точці P1 становлять $\varepsilon = 2,03$ мм/мм (Рис.3.3). Тобто похибка теоретичних та експериментальних даних становить 2,9%.

Аналогічні розрахунки проведемо для визначення інтенсивності деформації. На Рис.3.4 наведена реологічна картина зсуву для визначення інтенсивності деформацій. Розмір пластичної зони зсуву знаходиться в межах $\Delta y=0,07-0,14$ мм. Значення інтенсивності деформації в т. P1=10400 (мм/мм)/с

Швидкість переміщення в т.Р1 за даними реологічної моделі, наведеної на Рис.3.4 $V_w = 1240$ мм/с. Тоді за формулою (3.10), інтенсивність деформації матеріалу заготовки в точці Р1 становитиме:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\cos 5}{\cos(35 - 5)} \cdot \frac{1240}{0,13} = 10670 \text{ (мм/мм)/с}$$

Таким чином похибка теоретичних та змодельованих даних становить лише 2,5% [279].

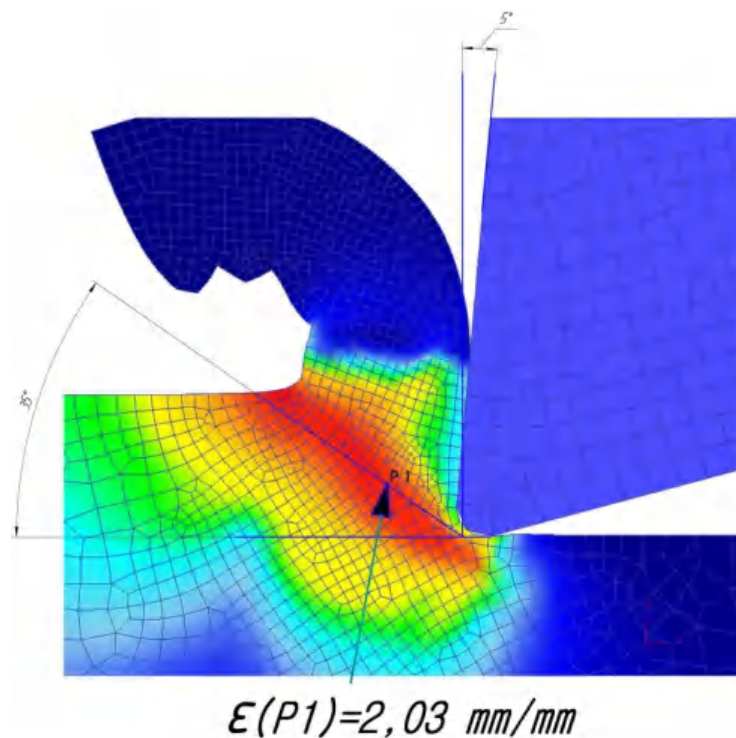


Рис.3.3. Схема для визначення деформації в точці Р1.

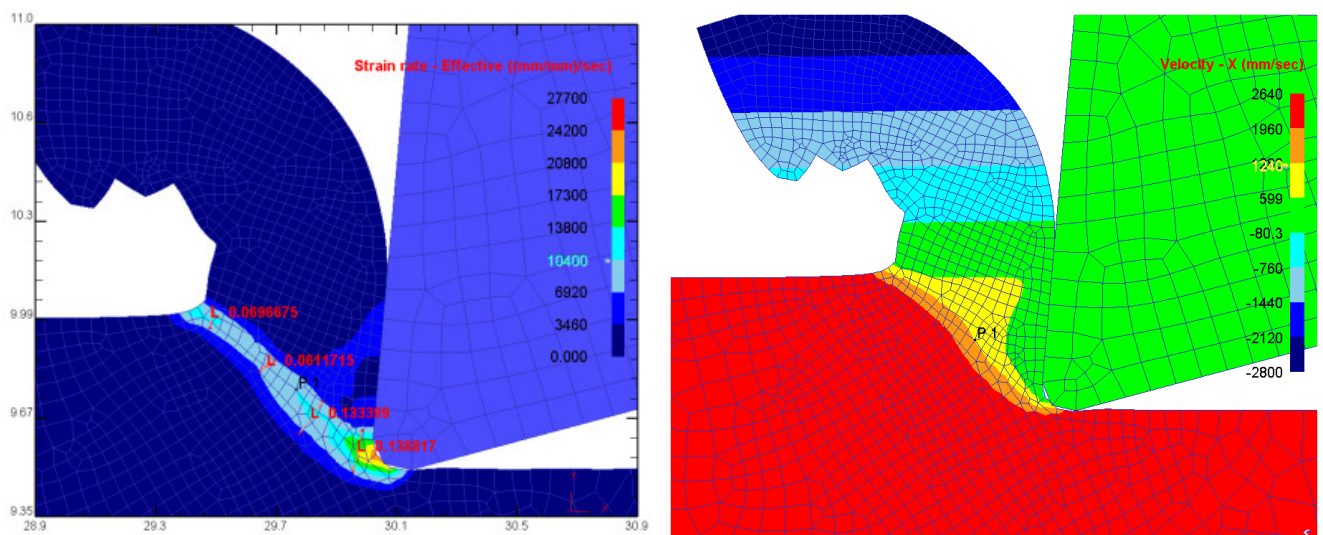


Рис.3.4. Схеми для визначення інтенсивності деформації в точці Р1

3.2. Аналіз формування силового та напружено-деформованого стану при обробленні деталей з найбільш репрезентативних машинобудівних матеріалів

3.2.1. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з конструкційних сталей на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей

Для аналізу впливу різних чинників на реологічну картину різання проведені імітаційні дослідження з різними матеріалами, режимами оброблення та геометричними параметрами різального інструменту. Хімічний склад, механічні властивості, мікроструктура в першу чергу впливають на оброблюваність сталей та температуру в зоні різання.

На Рис.3.5 наведені графіки сил різання при обробленні конструкційних сталей 20 та сталі 45 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв). Чисельні результати моделювання наведені в додатку Г1.

При обробленні матеріалів з малим вмістом вуглецю (сталь 20 – Рис.3.5(а)) стабілізація сил різання відбувається досить швидко - приблизно за час 1,0 мс. При цьому коливання радіальної складової P_y є незначними ($\Delta P_y \approx 30$ Н, що становить приблизно 5-7% від складової сили різання), тому забезпечення високої якості обробленої поверхні за рахунок керованості режимами різання цілком допустиме [270, 273, 275, 279, 289]. Оптимальним, з точки зору забезпечення періоду стійкості інструменту, можна вважати вміст вуглецю в сталі в межах 0,10...0,20 %. Наявність у низьковуглецевих сталей ($C < 0,3\%$) пластинчастого перліта та дрібні феритні включення суттєво підвищують їх оброблюваність.

При підвищенні в конструкційній сталі вмісту вуглецю в межах 0,30...0,50% (що проілюстровано на прикладі оброблення сталі 45 – рис.3.6.(б)) спостерігається зростання часу стабілізації сил різання в 2,5 рази (до 2,5 мс) та помітне збільшення коливання радіальної складової P_y ($\Delta P_y \approx 50$ Н, що становить приблизно 15-17% від складової сили різання), що суттєво ускладнює процес керованості при забезпеченні високої точності оброблення (див. додаток Д1). Крім того, зниження стійкості інструмента обумовлене появою в мікроструктурі середньовуглецевої сталі абразивних часток цементиту [327].

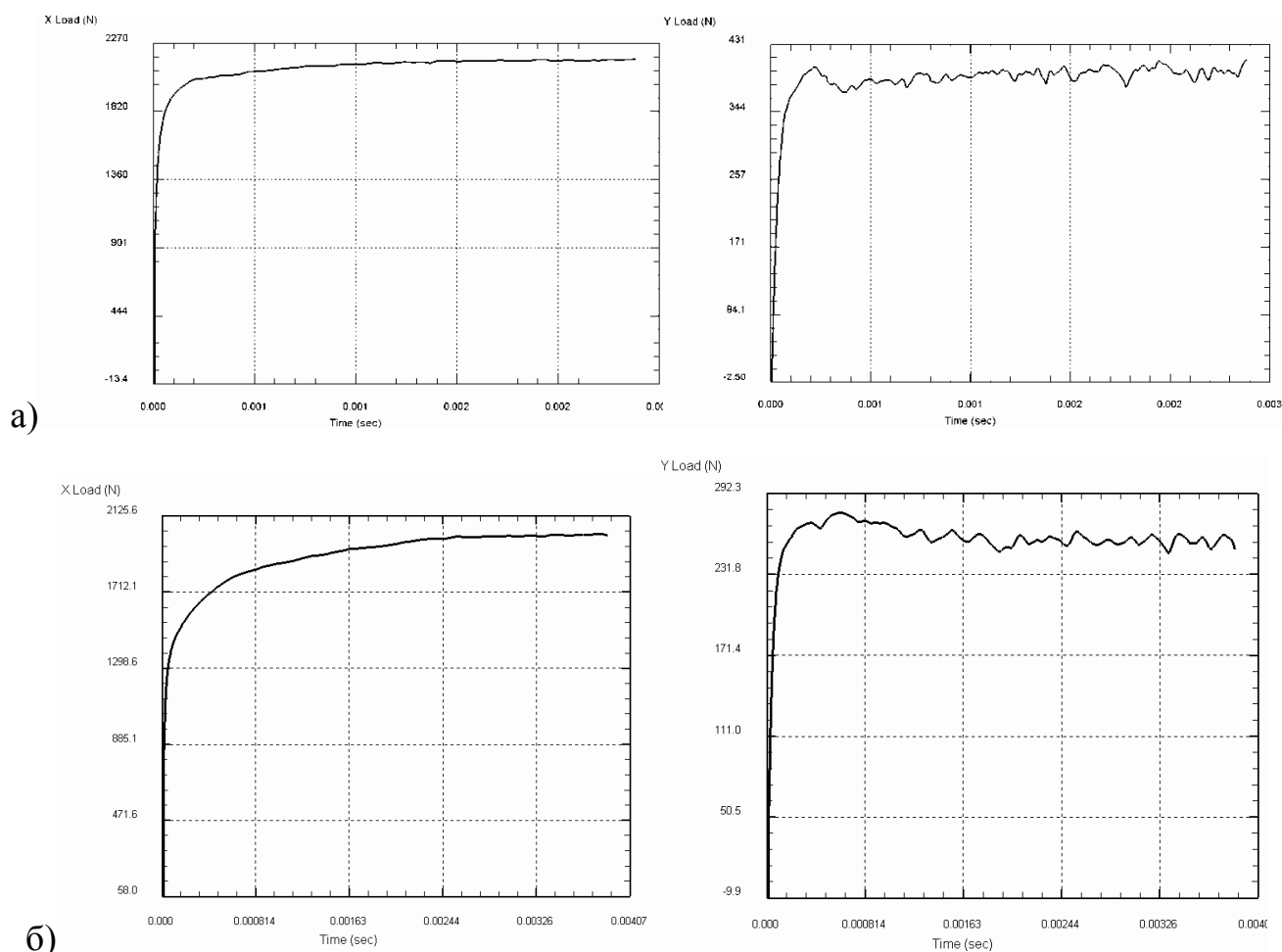


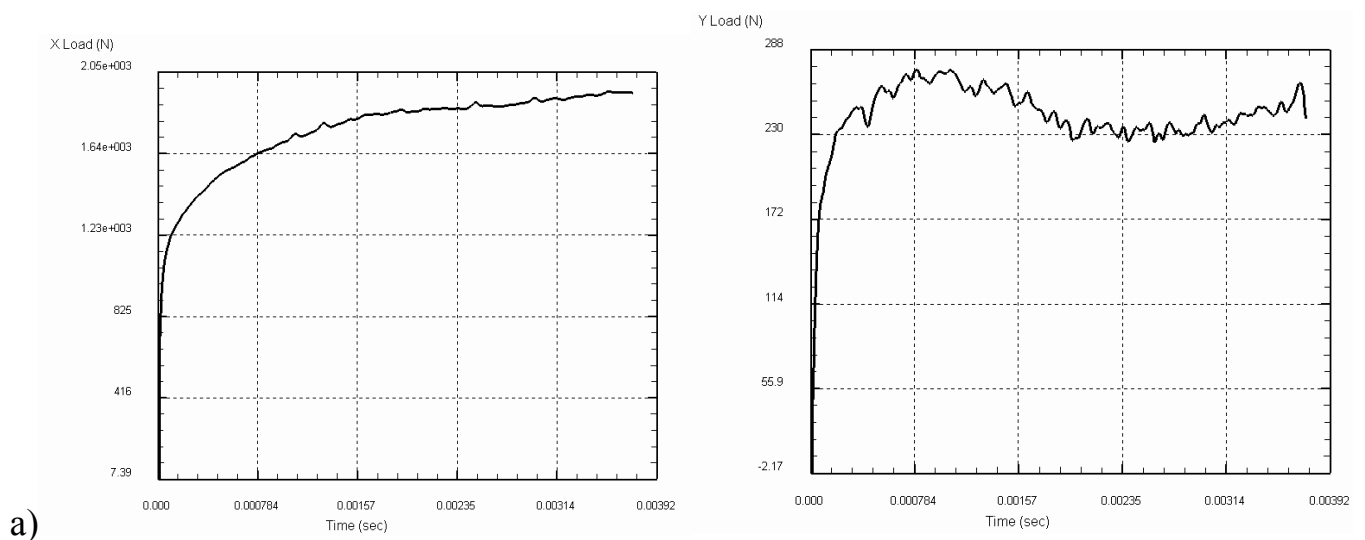
Рис.3.5. Складові сил різання сталі 20 (а) та сталі 45 (б), визначені на основі аналізу реологічних імітаційних моделей в системі Deform 2D

3.2.2. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з легованих сталей на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей

У легованих низьковуглецевих сталей вплив вуглецю складніший, оскільки це пов'язано з утворенням карбідів різного складу, їх розмірами, твердістю і т.д. Наявність в сталі марганцю зміцнює ферит, знижує пластичність сталі і це спричинює зростання сил різання, що підтверджується аналізом реологічного моделювання при обробленні легованих сталей (Рис.3.6). При поєднаннях $C < 0,20\%$ і $Mn < 1,5\%$ процес різання значно покращується. При високому вмісті марганцю (понад 10 %) сталь має схильність до наклепу під дією сил різання, внаслідок чого різко зростає міцність, знижується пластичність поверхневого шару деталі, по межах зерен утворюються залізомарганцеві карбіди, а аустеніт частково переходить в мартенсит [21].

Оброблюваність в цьому випадку дуже низька. Підвищити її можна при попередньому нагріванні заготовок до температури 400...600°C, чим аніглюються шкідливі наслідки наклепу. За наявності в сталі деякої кількості сірки в ній утворюються сульфіди марганцю, що виконують функцію змащування на поверхнях тертя. Фосфор, сірка, свинець використовуються як присадки, що покращують оброблюваність таких сталей. В свою чергу, збільшений вміст кремнію значно погіршує оброблюваність сталей внаслідок утворення силікатних абразивних включень. Наявність молібдену, ванадію, хрому, вольфраму підвищує міцність і в'язкість сталей, погіршуючи їх оброблюваність. Ці елементи утворюють тверді розчини із залізом і карбіди різного складу і твердості. Як наслідок, зростає здатність матеріалу швидко зношувати різальне лезо інструмента. Хром, сприяючи коагуляції карбідних часток при відпуску, значно знижує теплопровідність матеріалу. Кобальт, навпаки, уповільнює коагуляцію карбідів, підвищуючи теплопровідність. Він незначно впливає на зменшення міцності і в'язкості легованих сталей, створюючи хімічно-стійку сполуку із залізом. Наявність нікелю в твердому розчині сприяє зміцненню матеріалу деталі, проте знижує оброблюваність сталей (Рис.3.6 (б)).

На Рис.3.6(б) наведені графіки сил різання при обробленні корозійностійких легованих сталей - сталі 10X17P13M2T (аналог 316h¹) та 34X2H2M (аналог сталі 4340¹) (подача S=0,25 мм; глибина різання t=1 мм; швидкість різання V=120 мм/хв) [270, 273, 275, 279]. Чисельні результати моделювання наведені в додатку Г2.



¹ Стандарт США ASTM 915, євростандарт EN 10363-3, стандарт Японії – JIS G4051.

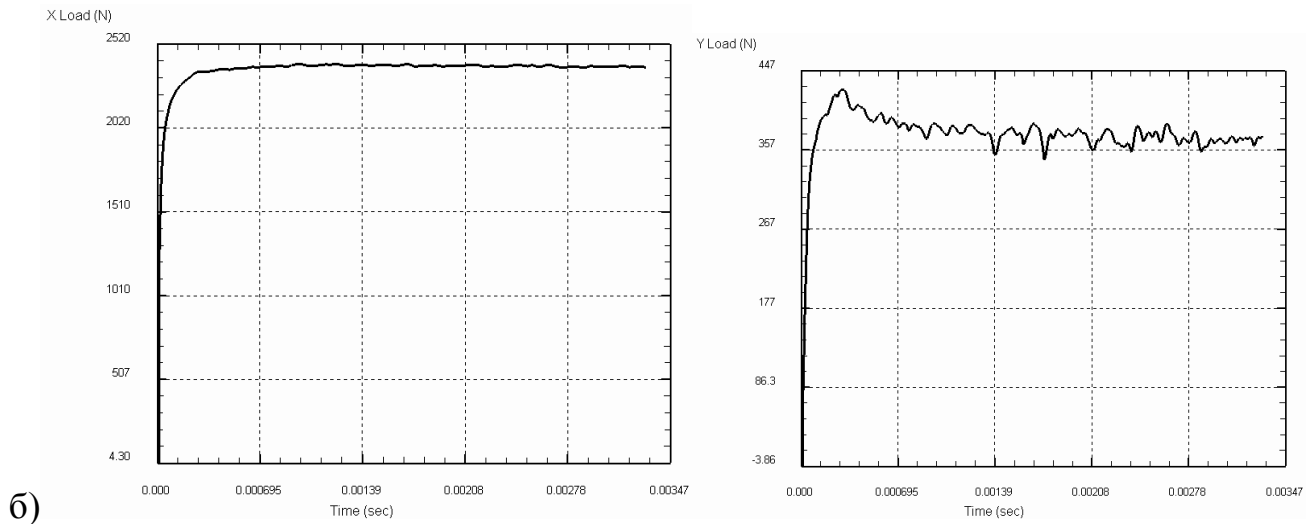


Рис.3.6. Складові сил різання легованих сталей 10X17P13M2T (а) та 34X2H2M (б), визначені на основі аналізу реологічних імітаційних моделей в системі Deform 2D

З аналізу реологічної моделі можна зробити висновки, про те, що збільшення вмісту вуглецю в 3,5 рази (для вищенаведеного прикладу оброблення легованих сталей 10X17P13M2T та 34X2H2M) сприяє підвищенню сили різання на 20% (з 2,05 кН до 2,5 кН). Крім того, для сталі 10X17P13M2T великий час стабілізації сил різання (3,5 мс) та значні макроколивання складової сили різання P_y ($\Delta P_y \approx 80$ Н, що становить приблизно 25-27% від радіальної складової сили різання) значно погіршують умови якісного оброблення поверхні, спричинюючи автоколивання інструменту. Основна причина цього – наявність у структурі цієї сталі 17% хрому, що викликає коагуляцію карбідних домішок при відпуску, значно знижує теплопровідність матеріалу, а отже створює проблеми ефективного теплообміну в зоні різання. Натомість, для легованої сталі 34X2H2M стабілізація сил різання настає у короткий час (приблизно 0,4 мс), коливання складової сили P_y не перевищують 8...10% [270, 273, 275, 279].

3.2.3. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з алюмінієвих сплавів на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей

В порівнянні із сталями, алюмінієві сплави мають меншу твердість, нижчий тимчасовий опір і кращу теплопровідність [90], що дозволяє значно підвищувати швидкість різання і подачу. Проте вибір оптимальних умов оброблення ускладнений через інтегральну дію багатьох чинників. Висока в'язкість ряду алюмінієвих сплавів

спричинює інтенсивне налипання частинок зруйнованого матеріалу на робочі поверхні різального інструменту. Це затрудняє стружкоподрібнення, може викликати пакетування стружки в канавках інструменту і утворення задирів на обробленій поверхні. При нагріванні алюміній сильно розширюється (у 2 рази більше, ніж сталь), що перешкоджає досягненню високої точності оброблення при чистових, а особливо, при фінішних методах лезового оброблення матеріалів.

Номінальні значення сил різання при обробленні алюмінієвого сплаву АД33 (Al=95...98%; Fe до 0,7%; Si=0,4...0,8%; Mn до 0,15%; Cr=0,15...0,35%; Ti до 0,15%; Cu=0,15...0,4%; Mg =0,8...1,2%; Zn до 0,25%) в 2,2 рази нижче, ніж при обробленні конструкційної сталі 20 (Рис.3.7). Чисельні результати імітаційного реологічного моделювання в системі Deform-2D наведені в додатку Г3.

Зв'язок між силами різання і характером мікроструктури алюмінієвих сплавів такий: сила різання вище при обробленні сплавів з рівномірною структурою, коли вміст твердого розчину кремнію в алюмінії перевищує вміст евтектики; якщо частки евтектики мають грубішу пластинчасту форму, сили різання є меншими. Рівень допустимих швидкостей різання, що забезпечують низьку шорсткість обробленої поверхні і нормативні періоди стійкості, при обробленні алюмінієвих сплавів в кілька разів вище, чим при обробленні сталей [90].

На Рис.3.7 наведені графіки сил різання при обробленні алюмінієвого сплаву АД33 ГОСТ 4794-97 (аналог AL6061²) (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв). З аналізу графіків складових сил різання можна відзначити незначні коливання складової сили P_y (до 10%) і різкий спалах сил різання на початку врізання інструменту як результат подолання енергетичного бар'єру при перетворенні сили пружності у сили пластичного деформування та руйнування (див. додаток Г3). Для більшості інших конструкційних матеріалів цей ефект також має місце, проте він не проявляється настільки явно, оскільки значення стабілізованих сил різання в декілька разів вищі.

² Стандарт США ASTM 1008, євростандарт EN 730-1, стандарт Японії – JIS G4032.

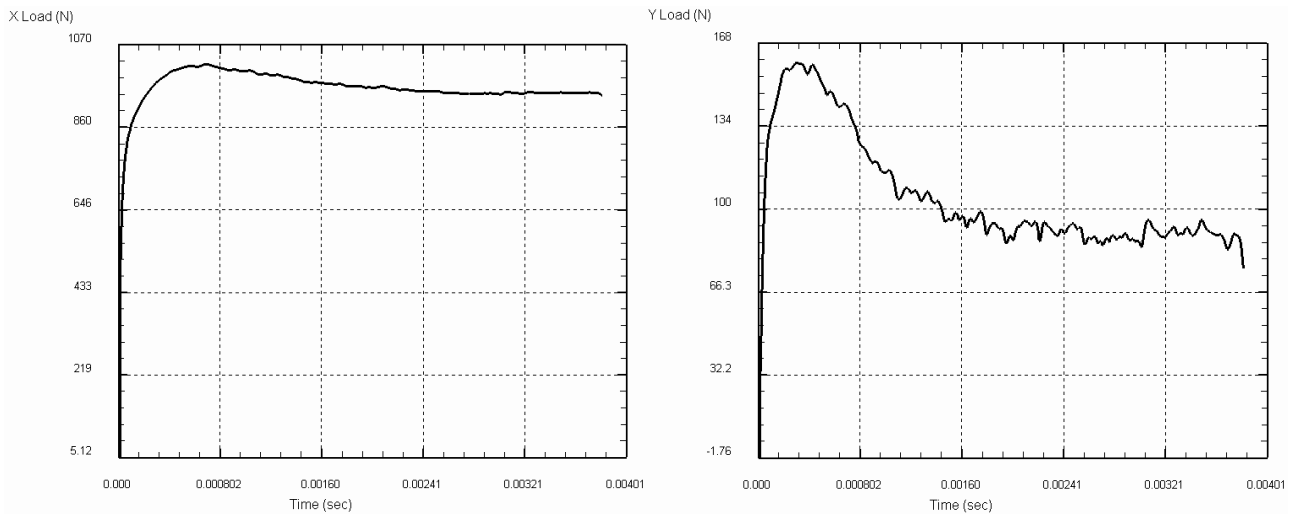


Рис.3.7. Складові сил різання алюмінієвого сплаву АД33, визначені на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

3.2.4. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з жароміцних сталей та сплавів конструкційних сталей на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей формоутворення

За фізико-механічними властивостями жароміцні, жаростійкі і нержавіючі сталі і сплави мають багато спільного, що обумовлює їх технологічні властивості їх оброблюваності. Залежно від хімічного складу і для забезпечення задовільної оброблюваності різанням важкооброблювані сталі і сплави мають різну структуру: феритну, мартенситно-феритну, аустенітну і аустенітно-мартенситну [327]. Складніша оброблюваність жароміцних та нержавіючих сталей і сплавів в порівнянні із конструкційними сталями визначається їх фізико-механічними характеристиками, хімічними властивостями, структурою, теплофізичними показниками.

Аналізуючи загальний вплив хімічних елементів на оброблюваність деталей при різанні [75, 94, 232, 327], можна відзначити високе зміцнення матеріалу жароміцних сталей і сплавів в процесі його руйнування різанням. Жароміцні і нержавіючі сталі найчастіше відносяться до сталей аустенітного класу, що містять кристаліти з гранецентрованою кристалічною граткою. У зв'язку з цим, сплави аустенітного класу відзначаються низькою межею текучості незмінному значенні тимчасового опору. Для жароміцних сталей відношенням умовної межі текучості, що відповідає 0,2%-ій залишковій деформації, до тимчасового опору становить лише 40... 45%, тоді як для

конструкційних сталей ця величина складає 60...65% і більше [248].

Дослідження мікротвердості коренів стружки показали, що при обробленні сталі ХН60Ю вона приблизно в 2 рази більше, ніж у недеформованого металу; відносне зміцнення для сплавів хромонікелевих сплавів складає 50...60 %, що значно нижче цих же значень при обробленні середньовуглецевих конструкційних сталей [232].

Жароміцні і нержавіючі сталі і сплави мають низьку теплопровідність в порівнянні з традиційними для машинобудування конструкційними матеріалами. При їх обробленні виділяється значна кількість теплоти, різко зростає рівень температур в зоні різання. При порівнянні температурних полів при обробленні сталі 20 і жароміцного сплаву ХН60Ю (режими різання - подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв), можна зробити висновок, що температура в зоні різання жароміцного сплаву на 50% вище від температури при обробленні сталі 20 (Рис.3.8). Це сприяє активізації адгезійних і дифузійних процесів, інтенсифікує зношування робочих поверхонь інструментів.

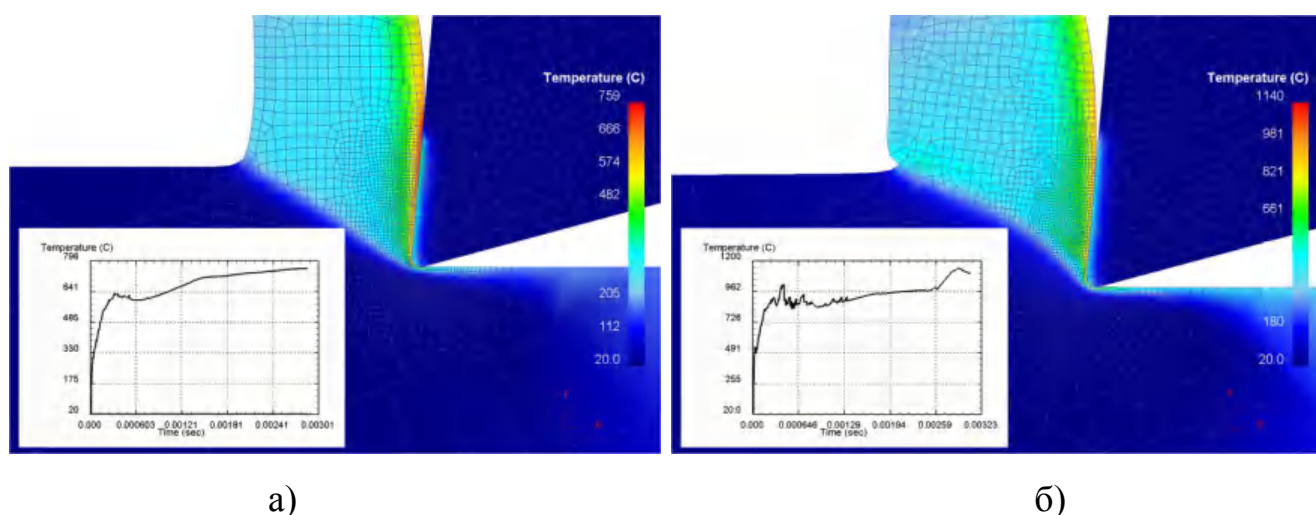


Рис.3.8. Порівняння температурних полів при обробленні сталі 20 (а) і жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718³) (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв)

Здатність даних матеріалів зберігати початкову міцність і твердість при підвищених температурах призводить до того, що в процесі різання інструмент

³ Стандарт США ASTM 915, євростандарт EN 10363-3, стандарт Японії – JIS G4051.

отримує високі питомі навантаження. Так, при нагріві сплаву ХН60Ю до температури 700°C його тимчасовий опір $\sigma_B = 900 \dots 1000$ МПа, а при температурі 800°C $\sigma_B = 800 \dots 900$ МПа. У свою чергу, при нагріванні сталі 45 до цих температур величина σ_B , знижується в 3-5 разів [232]. Дуже слабе розм'якшення жароміцних і нержавіючих матеріалів при нагріванні до високих температур призводить до того, що на передній поверхні різального інструменту діють високі питомі навантаження (до 7000...11000 МПа) (Рис.3.9), що відповідають навантаженням, що виникають при обробленні загартованих конструкційних сталей з 60...64 HRC. Цій обставині сприяють також великі, в порівнянні з конструкційними сталями, значення коефіцієнту тертя на контактних ділянках, обумовлені інтенсивною адгезійною взаємодією. Висока хімічна спорідненість оброблюваного і інструментального матеріалів викликає їх прихоплювання і навіть руйнування контактних ділянок. Найбільшу здатність до адгезії мають метали, що мають підвищену пластичність, з атомними діаметрами, що розрізняються не більше ніж на 15...18 % (наприклад, залізо — хром, залізо — мідь) [327].

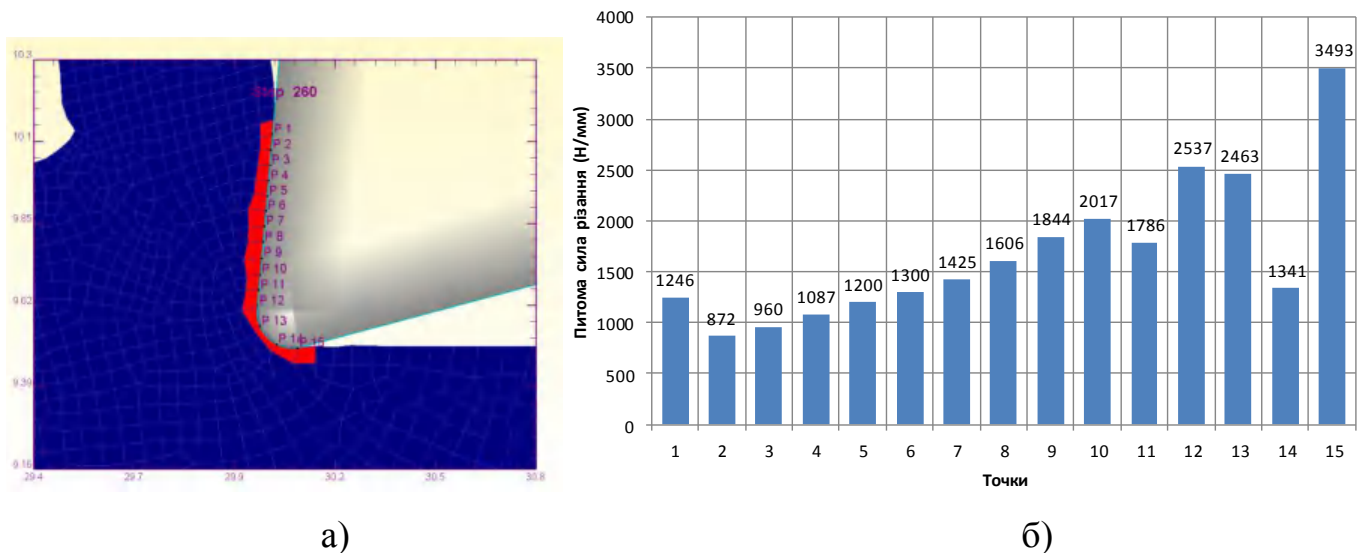


Рис.3.9. Хромографічна картина моделювання (а) та графічна інтерпретація (б) питомого навантаження на передню поверхню інструмента (по базових точках) при обробленні жароміцного сплаву ХН60Ю

Велика стираюча здатність жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів обумовлена наявністю в них фазових станів, коли утворюються інтерметалідні або

карбідні включення. Останні, подібно до абразиву, сприяють посиленому зношуванню інструменту. В процесі пластичної деформації жароміцних і нержавіючих матеріалів відбувається виділення карбідів, твердість яких наближається до твердості твердих сплавів вольфрамо-кобальтових та титано-кобальтових груп. Внаслідок цього різко зростає абразивна здатність жароміцних сплавів, особливо тих, що мають на нікелеву основу. Для таких матеріалів властивий значний розкид розмірів зерен, а також нерівномірність виділення карбідів і інтерметалідної фази після їх кування, штампування і особливо литва. Наявність таких зон призводить до різкого зростання сил різання і температури, що значною мірою обумовлює затуплення і руйнування різальних кромки інструменту.

Враховуючи розглянуті особливості, фізичну суть процесу різання нержавіючих і жароміцних матеріалів можна звести до наступного. Спочатку інструмент врізається в незміцнений метал, і під його дією відбувається пластична деформація шару металу, що супроводжується поглинанням енергії, яка прикладається ззовні; зрізуваний шар металу при цьому зміцнюється і стає крихким. Потім відбувається дуотермічний зсув і утворення елемента стружки. Внаслідок малої теплопровідності оброблюваного матеріалу теплота різання концентрується в зоні стружкоутворення і сприяє активізації процесів адгезії і дифузії, викликаючи руйнування різальних лез інструменту. Вказані явища разом з підвищеними абразивних і механічних властивостей нержавіючих і жароміцних матеріалів при високій температурі, а також змінна дія цих чинників, обумовлена вібраціями, інтенсифікують процес зношування різальних інструментів. Ці особливості жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів різко погіршують їх оброблюваність різанням в порівнянні із звичайними конструкційними сталями і чавунами. Швидкість різання з підвищенням жароміцності важкооброблюваних сталей і сплавів знижується в 10-20 разів в порівнянні з обробленням звичайної конструкційної сталі 45. При цьому в 1,5 рази зростають сили різання ($P_z = 2120$ Н - для сталі 45 (рис.3.6); $P_z = 3240$ Н – для сплаву ХН60Ю (рис.3.11)), що є причиною більш високих температур в зоні різання, а також невеликих періодів стійкості різального інструменту.

На Рис.3.10 наведені графіки сил різання при обробленні нікелевого жароміцного

сплаву ХН60Ю (аналог IN 718⁴) (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв). Чисельні результати моделювання наведені в додатку Г4.

Поява на 2,6 мс різкого стрибка сили різання викликано викривленням зовнішньої сторони стружки під впливом адіабатичних зсувних явищ (більш детально описаних нижче), що призводить до зміни кута зсуву та коефіцієнта усадки стружки. В динаміці процес зародження і розвитку надлому стружки при обробленні жароміцного сплаву ХН60Ю наведений на Рис.3.11

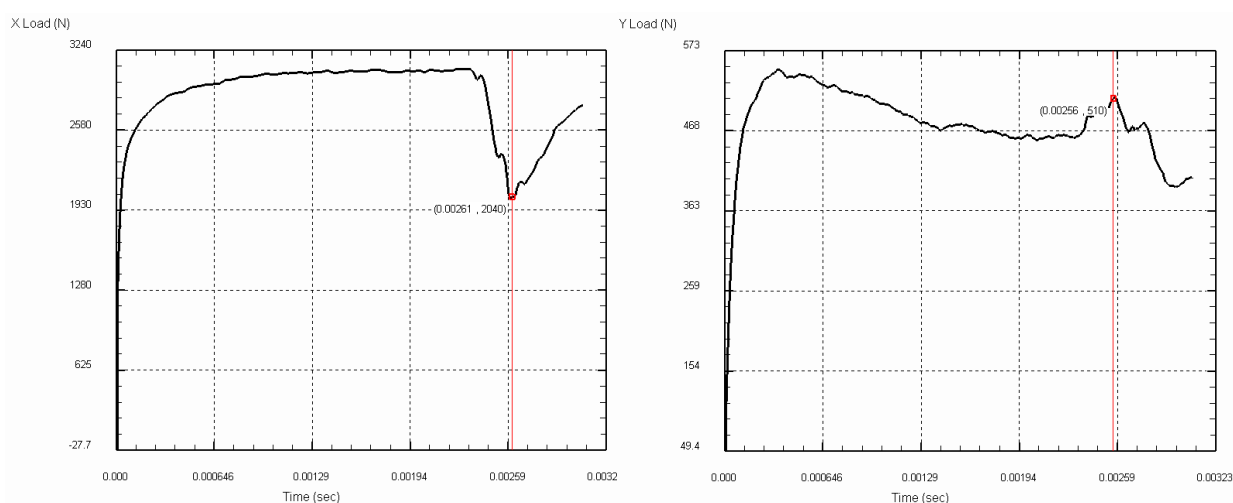


Рис.3.10. Складові сил різання жароміцного сплаву ХН60Ю, визначені на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

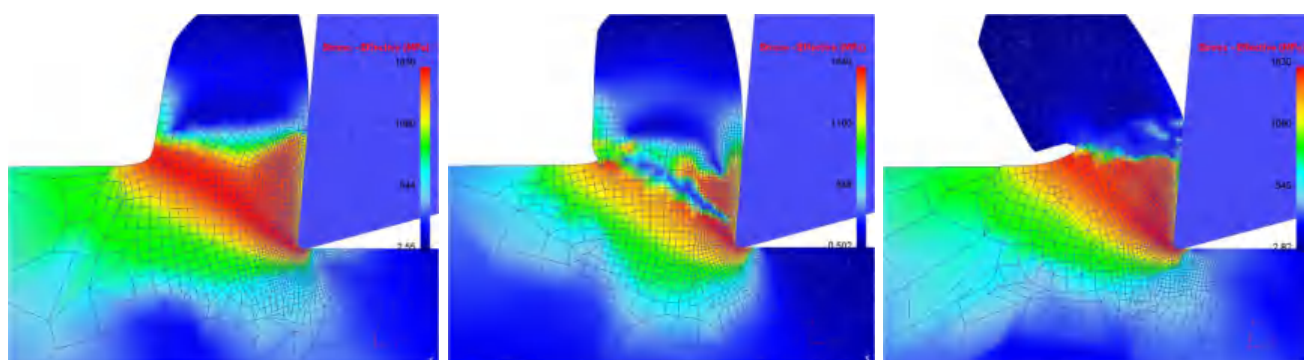


Рис.3.11. Процес утворення надлому стружки при обробленні жароміцного сплаву ХН60Ю (в динаміці).

⁴ Стандарт США ASTM 915, євростандарт EN 10363-3, стандарт Японії – JIS G4051.

3.2.5. Дослідження силових параметрів механічного оброблення виробів з титанових сплавів на основі аналізу імітаційно-реологічних моделей

Титан і його сплави погано обробляються різанням, що обумовлено специфікою його фізико-механічних властивостей. Ці сплави характеризуються високим відношенням межі текучості до тимчасового опору розриву - 0,85-0,95, тоді як для сталей воно дорівнює 0,65-0,75. В той же час механічні характеристики титанових сплавів (відносне видовження δ і відносне звуження ψ) в порівнянні з жароміцними сталями суттєво менші [98, 146, 282]. Знижені пластичні властивості титанових сплавів в процесі їх деформації сприяють розвитку випереджаючих мікро- і макротріщин. Стружка, що утворюється при обробленні титанових сплавів, на вигляд нагадує зливну, але має сколи, що розділяють її на дуже слабо деформовані елементи, міцно пов'язані тонким і сильно деформованим контактним шаром. Процес формотвірного моделювання такої стружки розглянуте нижче. У результаті при механічному обробленні титанових сплавів виникають великі питомі зусилля, що призводить до високих температур в зоні різання. Це спричинено низькою теплопровідністю високодеформованих зон в області стружкоутворення, що ускладнює відведення тепла із зони різання. Внаслідок сильної адгезії і високих температур титан налипає на різальний інструмент, що викликає значні сили тертя. Налипання і приварювання титану на контактні поверхні різального інструменту призводять також до зміни його геометричних параметрів. Відхилення геометричних параметрів різального інструменту від оптимальних їх значень призводить до подальшого підвищення сил різання і температури в зоні формоутворення і інтенсивного зношування леза інструменту. Кути адіабатичного зсуву при різанні титанових сплавів досягають 38...44° [282].

Для титанових сплавів характерна висока хімічна активність створення інтерметалідних структур на основі кисню, азоту та водню. Це викликає інтенсивну крихкість поверхневого шару заготовки внаслідок дифузії в нього атомів газів при підвищенні температури. Насичена атмосферними газами стружка втрачає пластичність і в цьому стані не піддається звичайній усадці. При обробленні титанових сплавів спостерігається схильність матеріалів різального інструменту абразивному

зношуванню внаслідок змісту в титанових сплавах нітриду і карбідів. Проте, при підвищенні температури міцність титанових сплавів знижується більш інтенсивно, ніж у нержавіючих і жароміцних сталей і сплавів. Оброблення різанням по кірці багатьох кованих, пресованих, литих заготовок з титанових сплавів ускладнене додатковою абразивною дією на різальні кромки інструменту неметалічних включення, оксидів, сульфідів, силікатів і численних дефектів, що утворюються в поверхневому шарі. Неоднорідність структури знижує вібростійкість процесу оброблення титанових сплавів. Ці обставини, а також концентрація значної кількості теплоти в межах невеликої ділянки контакту на передній поверхні призводять до переважання крихкого руйнування, як результат розвитку випереджаючих подачу інструмента мікро- та макротріщин, утворення локальних концентраторів напружень в місцях сколювання металу. При високих швидкостях різання інтенсифікується теплове зношування, на передній поверхні різця розвивається лунка.

На Рис.3.12 наведені графіки сил різання при обробленні титанового сплаву ВТ6 ГОСТ 19807-91 (аналог Ti6Al4V) (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв). Чисельні результати моделювання наведені в додатку Г5.

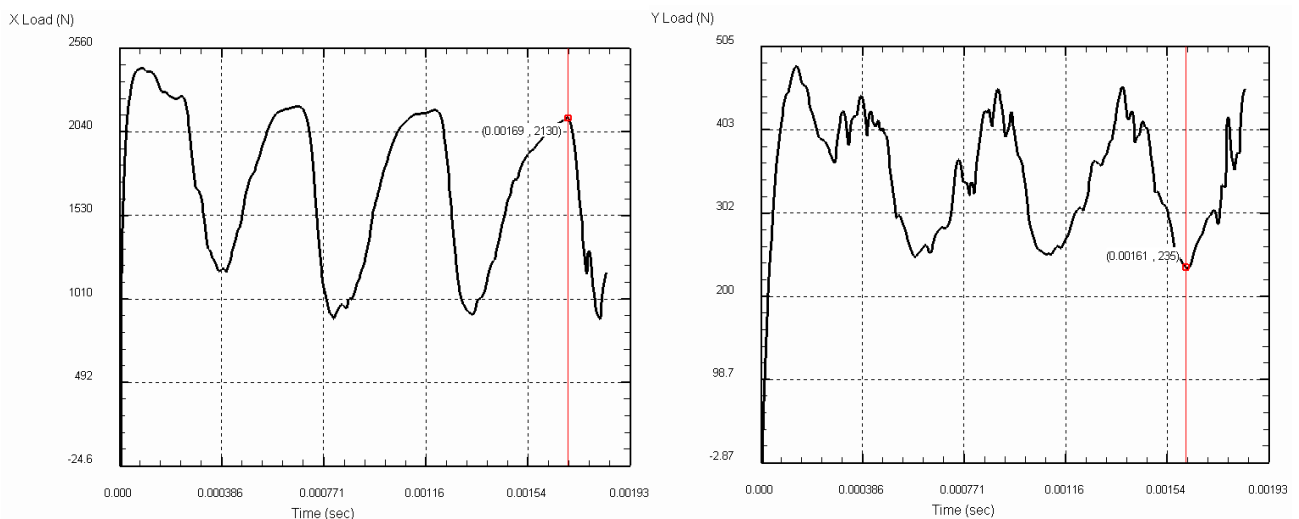


Рис.3.12. Складові сил різання титанового сплаву ВТ6, визначені на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

Оскільки при обробленні титанового сплаву ВТ6 має місце переважання крихкого руйнування з періодичним сколюванням матеріалу, у відповідності до

рекомендацій розділу 2.2, в імітаційній реологічній моделі використовувався деформаційний критерій руйнування Мак-Клінтока [272].

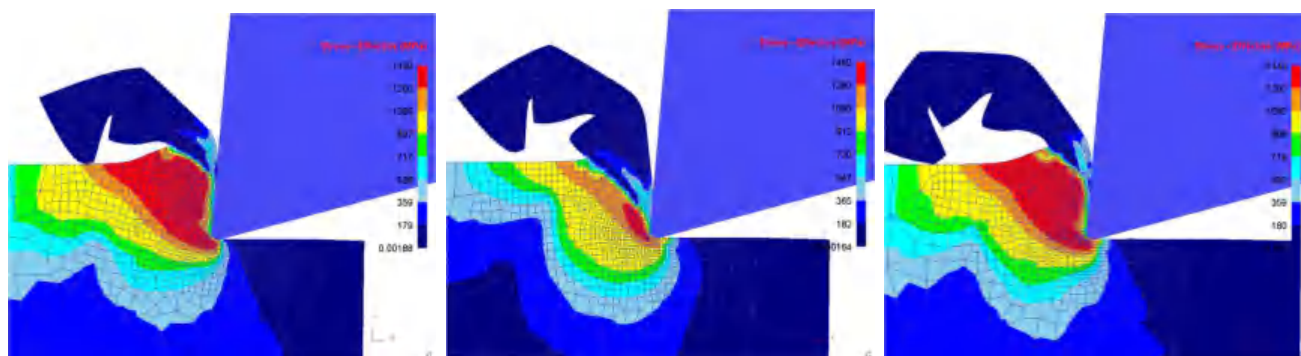


Рис.3.13. Реологічна картина напружень в зоні адіабатичного зсуву при обробленні титанового сплаву VT6 (в динаміці)

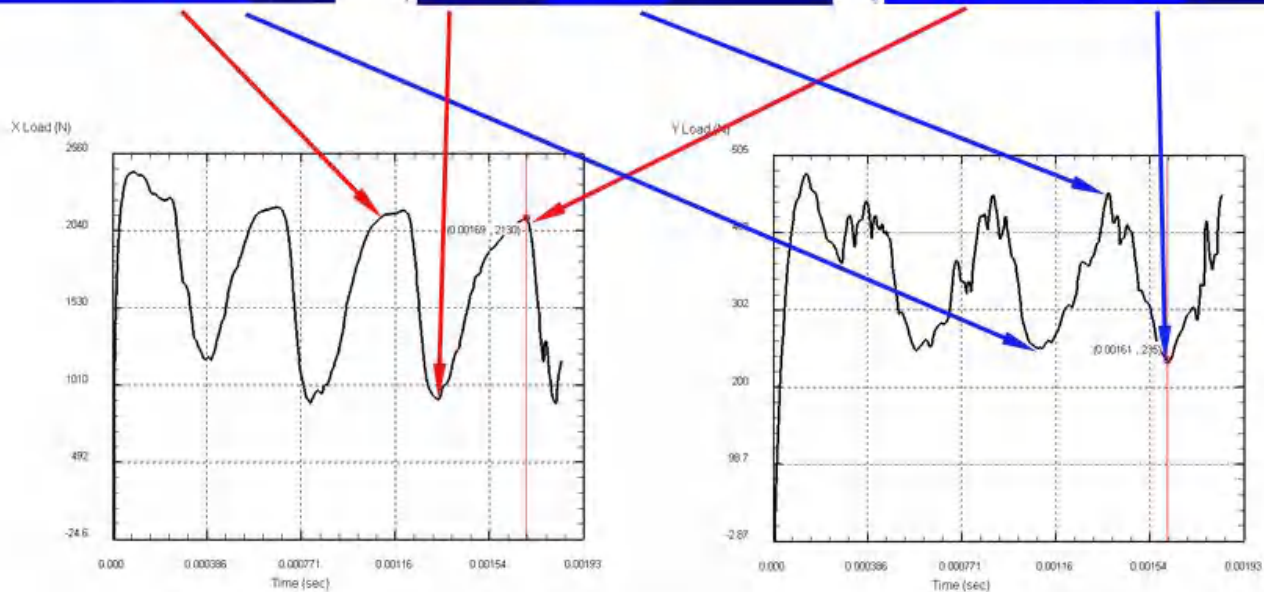
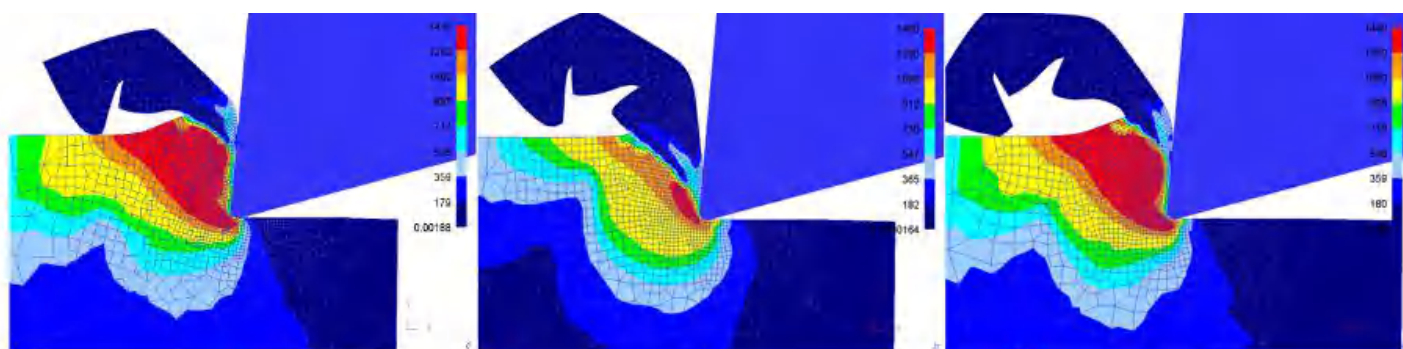


Рис.3.14. Зв'язок між реологічною картиною стружкоутворення і силовими параметрами різання в динаміці

В умовах високошвидкісної деформації матеріалу має місце адіабатичний зсув - утворення локальних зон підвищеної пластичної деформації, енергія якої перетвориться в теплову, що знижує межу текучості при підвищенні температури. Для

титанових сплавів характерна надзвичайно низька теплопровідність, значно нижча, ніж у жароміцних сталей і сплавів. Наприклад, для сплаву ВТ6 вона дорівнює 11 Вт/(м·К), тоді як для сталей 12Х18Н9Т і 45 — відповідно до 23 і 40 Вт/(м·К). Як наслідок, при різанні титанових сплавів виникає температура, що більш ніж у 2 рази що перевищує рівень температур при обробленні сталі 45. При активному виділенні тепла в умовах стружкоутворення з більшою швидкістю, ніж його відведення в середовище охолодження за рахунок теплопровідності, тепло концентрується поблизу смуг або площин ковзання, що призводить до виникнення так званих адіабатичних смуг зсуву (Рис.3.15). Відомо, що при температурі вище 800°C титанові сплави проявляють властивість надпластичності [58, 75, 152]. При зсувній деформації перехід від однорідної деформації до адіабатичного зсуву визначається величиною і швидкістю деформації. На прикладі, наведеному на Рис.3.15 чітко окреслені зони надлишкової деформації ($\varepsilon = 4 \dots 8$ мм/мм), ще більш локалізована зона інтенсивності деформацій ($\dot{\varepsilon} = 104000 \dots 130000$ ((мм/мм)/сек). Температура в області адіабатичного зсуву ($t = 1350 \dots 1390^\circ\text{C}$) залежить крім величини і інтенсивності деформації і від теплофізичних характеристик матеріалу. Утворення адіабатичних смуг зсуву може привести до руйнування по цих смугах і утворенню сегментної стружки. У області високих температур може протікати поліморфне перетворення або утворення зони інтенсивного зсуву. У екстремальних умовах, коли відбувається процес стружкоутворення, найбільш імовірно встановлення динамічної рівноваги між кристалічною і аморфною структурними фазами матеріалу – в даному випадку титанового сплаву ВТ6.

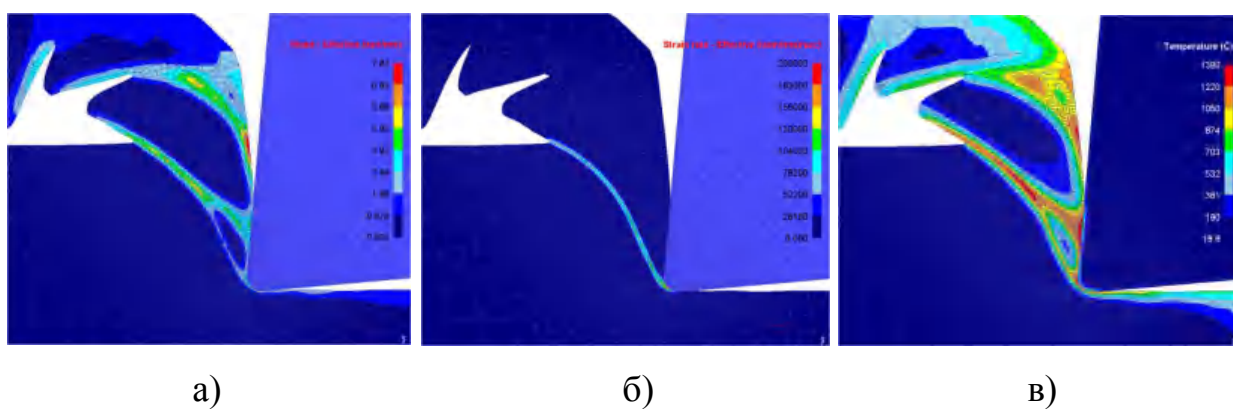


Рис.3.15. Хромографічні картини розподілу деформацій (а), інтенсивності зміни деформацій (б) та температурного поля (в) при лезовому обробленні деталей з титанового сплаву ВТ6

Таким чином, результати вивчення реологічного процесу стружкоутворення при обробленні сплавів на основі титану, нікелю, молібдену та вольфраму показують, що специфічна динаміка процесу стружкоутворення, характерна для адіабатичного зсуву, обумовлює характер циклічності дії сил різання в площині зсуву та геометричної зміни кута зсуву. Кількість елементів зсуву при одному врізанні різального клина в метал визначає частоту коливань сили зсуву за час контакту, а зміна опору металу зсуву на початку і кінці шляху ковзання в умовах високої температури, великої швидкості деформації і гідростатичного стиску визначає величину амплітуди сили. В результаті, процес утворення стружки при обробленні зі швидкостями до 160 м/хв відбувається в умовах нестійкого різання, що веде до виділення великої кількості теплоти, виникнення макроскопічних залишкових напружень першого роду в металі поверхневого шару заготовки (Рис.3.16), інтенсивному зношуванні інструменту і динамічній нестабільності в зоні різання. Причому залишкові напруження виникають синхронно з зростанням складової сили різання по осі Y (рис.3.15) [282].

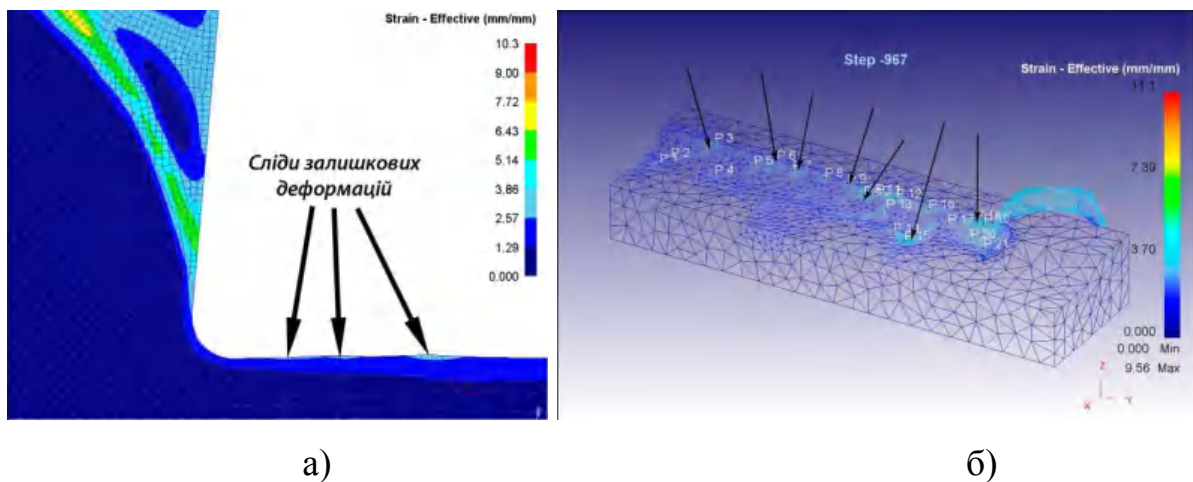


Рис.3.16. Сліди залишкових деформацій у випадку стружкоутворення в зоні адіабатичного зсуву (моделювання в 2D (а) та 3D (б) системах програмного продукту Deform

3.3. Аналіз залежності технологічних параметрів різання від переднього кута різального клина на основі реологічного моделювання

Суттєвий вплив на формування напружено-деформованого стану заготовки в зоні стружкоутворення має величина переднього кута різального клина. З метою дослідження впливу цього геометричного показника інструменту на чинники, що

впливатимуть на формування силових та деформаційних параметрів процесу різання, проведений аналіз реологічного імітаційного моделювання при обробленні різнорідних конструкційних матеріалів, що найчастіше використовуються в машинобудуванні. Чисельні результати імітаційного реологічного моделювання наведені в додатку Г.

При обробленні пластичних матеріалів із середніми режимами різання і геометричними параметрами різального інструменту, напружене поле стружки має більший вплив на деформацію металу поверхневого шару, ніж напружене поле в зоні діатермічного зсуву. Зі збільшенням переднього кута γ сила різання зменшується і процес відділення стружки протікає з меншою затратою енергії, а отже оброблюваний матеріал менше підлягає деформаціям. Проте, при великих передніх кутах ($\gamma > 15^\circ$) міцність різця знижується: ріжуча кромка такого різця швидко зношується і нерідко навіть викришується. Тому, коли підбирають передній кут γ , мають на увазі не тільки зменшення сили різання, але й одержання необхідної міцності різального леза і стійкості різця.

На Рис.3.17 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента γ при обробленні конструкційних сталей 20 та сталі 45 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв). Чисельні результати імітаційно-реологічного аналізу залежності силових чинників від геометрії леза інструменту для найбільш репрезентативних машинобудівних матеріалів наведені в додатку Г.

Аналізуючи графіки, наведені на Рис.3.17, можна зробити висновок про те, що передній кут інструменту суттєво впливає на величину сили різання, а саме при обробленні сталі 20 збільшення кута γ від 5° до 15° призводить до зменшення сили різання P_z лише на 5%, а при обробленні деталі зі сталі 45 – взагалі зменшення сил різання спостерігається лише в неусталеній частині врізання інструмента. Це пояснюється тим, що на етапі врізання ділянка контакту інструмента і заготовки при більших кутах γ є меншою, а отже зменшуються і питомі навантаження. Натомість, при зменшенні кута γ від 5° до 0° відбувається суттєве зростання сили різання P_z – приблизно на 25% при обробленні деталей зі сталей 20 і 45 [289].

З метою аналізу коливань інструмента в поперечному напрямку

(перпендикулярному напрямку подачі), проведений аналіз динаміки зміни радіальної складової сили різання P_y , як величини, що найбільше впливає на частоту та амплітуду коливань інструмента [232]. Реологічні дослідження проводились при аналогічних режимах різання (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв), для оброблення заготовки, виготовленої зі сталі 20 інструментом з передніми кутами $\gamma = -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 15^\circ$ [289].

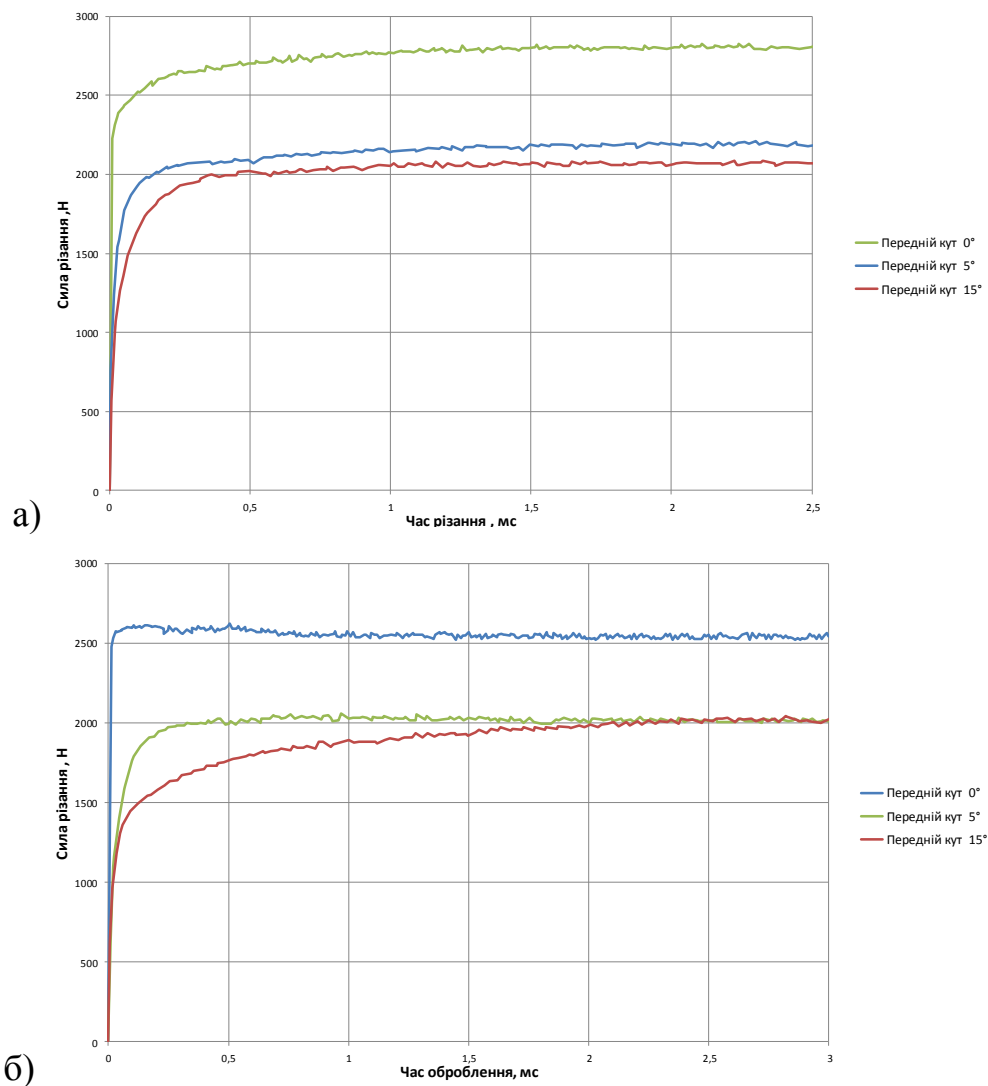


Рис.3.17. Графіки залежності сил різання від переднього кута γ при обробленні сталі 20 (а) та сталі 45 (б), визначені на основі аналізу реологічних імітаційних моделей в системі Deform 2D

Аналіз цих графіків (Рис.3.18) дозволив виявити деякі закономірності, що підтверджують та розвивають результати теоретичних та експериментальних

досліджень, наведених проф. Подураєвим В.Н. та проф. Жарковим І.Г. у роботах [135, 232]. Сила P_{Σ} , що збурює коливання інструмента, формується за рахунок векторної суми реакції сили тертя стружки об передню поверхню інструменту P_T в зоні стружкоутворення, сили тиску стружкового сегменту на передню поверхню інструмента P_f , та сили відтиску інструменту P_R за рахунок пружної деформації металу на обробленій поверхні заготовки в зоні задньої його поверхні (Рис.3.19).

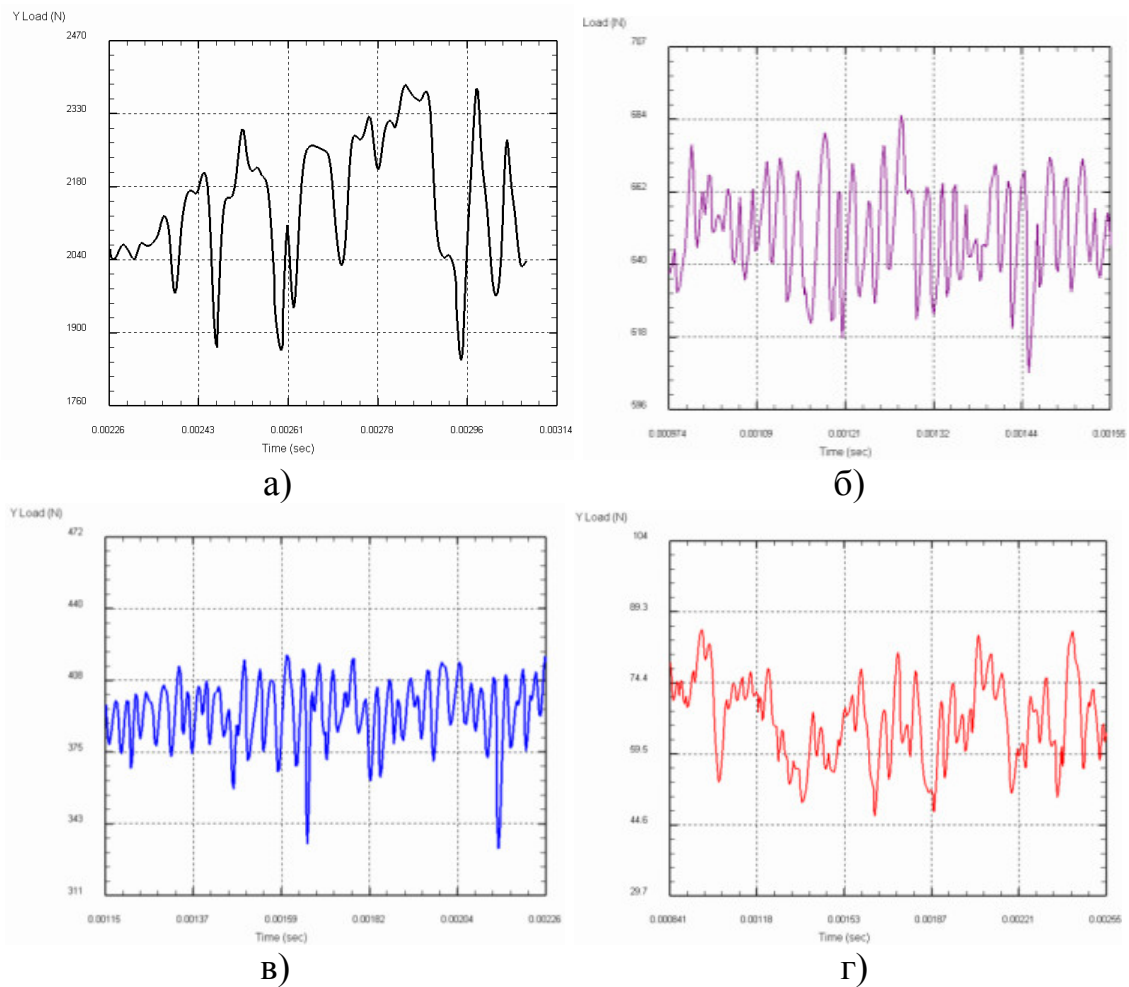


Рис.3.18. Графіки коливань радіальної складової сил різання ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ мм/хв), для оброблення заготовки, виготовленої зі сталі 20 інструментом з передніми кутами різання $\gamma = -5^\circ$ (а), $\gamma = 0^\circ$ (б), $\gamma = 5^\circ$ (в), $\gamma = 15^\circ$ (г)

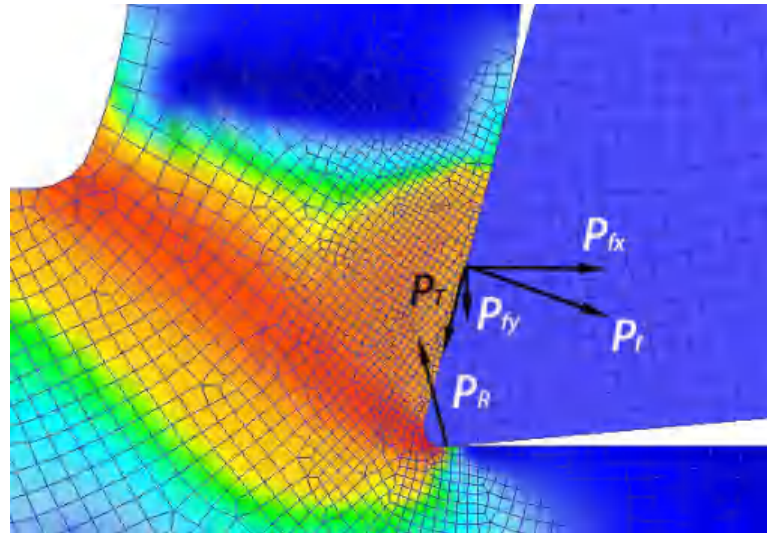


Рис.3.19. Схема дії сил на передній поверхні інструмента

Приводячи проекції сил на вісь Y для позитивного переднього кута ($\gamma > 0^\circ$), отримаємо:

$$P_{\Sigma} = P_f \cdot \cos \gamma + P_T \cdot \sin \gamma - P_R \cdot \sin \alpha .$$

У випадку негативного переднього кута ($\gamma < 0^\circ$):

$$P_{\Sigma} = P_T \cdot \sin \gamma - P_R \cdot \sin \alpha - P_f \cdot \cos \gamma .$$

А при умові $\gamma = 0^\circ$:

$$P_{\Sigma} = P_T \cdot \sin \gamma - P_R \cdot \sin \alpha$$

Якщо прийняти, що задній кут α різального клина залишається незмінним, то очевидно, що найбільші коливання матимуть місце при умові, що силі тертя стружки об передню поверхню інструменту P_T будуть протидіяти співнаправлені сила тиску стружкового сегменту на передню поверхню інструмента P_f , та сила пружного відтиску інструменту P_R . Тобто, сила тиску стружки на передню поверхню не буде гасити коливання інструмента, викликані динамічною зміною кута зсуву, коливаннями температури в зоні стружкоутворення, дефектами матеріалу, залишковими деформаціями, отриманими від попередніх методів оброблення тощо, а навпаки, буде їх збурювати. Це можливо за умови негативного переднього кута ($\gamma < 0^\circ$) різального клина. У випадку ж позитивного кута ($\gamma > 0^\circ$) – маємо зворотну картину: різальний інструмент попадає у своєрідний «клин» між стружковим елементом і обробленою

поверхнею. Причому дії сил на цих поверхнях є протилежними за напрямком, що і спричинює гасіння коливань інструмента.

Аналіз результатів реологічного моделювання цілком підтверджує ці теоретичні твердження. Так, оброблення деталі зі сталі 20 на режимах різання - подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв, при передньому куті інструмента $\gamma = -5^\circ$ спричинює коливання радіальної складової сили різання P_y в межах 280...430 Н (Рис.3.18 (а)), при передньому куті інструмента $\gamma = 0^\circ$ коливання складової сили різання P_y становить лише 40...60 Н (Рис.3.18 (б)), при передньому куті інструмента $\gamma = 5^\circ$ викликає коливання складової сили різання P_y є в межах 25...30 Н (Рис.3.18 (в)), а при передньому куті інструмента $\gamma = 15^\circ$ викликає коливання складової сили різання складає лише в межах 5...10 Н (Рис.3.18 (г)). Силі коливання є еквівалентом формоутворюючих вібрацій інструмента, що суттєво впливає на точність та шорсткість обробленої поверхні [289]. Більш детально ці питання будуть розкриті у наступному розділі дисертаційної роботи.

На Рис.3.20 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента γ при обробленні легованої сталі 34Х2Н2М (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв) (див. додаток Г2). Аналізуючи залежність силових параметрів від переднього кута інструменти при обробленні легованих сталей, можна спостерігати картину, аналогічну обробленню конструкційних сталей, з тією лише різницею, що вплив зменшення кута γ супроводжується ще більшим зростанням сили різання. Аналогічно зростають і коливання інструменту.

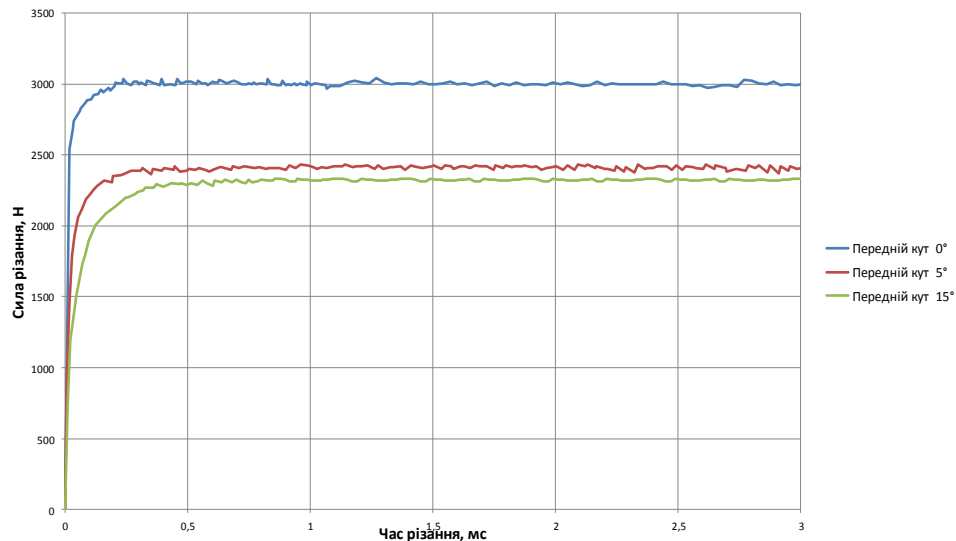


Рис.3.20. Графік залежності сили різання від переднього кута γ при обробленні легованої сталі 34X2H2M, визначеної на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

Аналіз графіків впливу переднього кута інструменту на силу різання при обробленні легованої сталі 34X2H2M, наведених на рис.3.22, дозволяє зробити висновки, що збільшення кута γ від 5° до 15° призводить до зменшення сил різання лише на 7%, а при зменшенні кута γ від 5° до 0° відбувається суттєве зростання сили різання – приблизно на 20%.

На Рис.3.21 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента γ при обробленні алюмінієвого сплаву АД33 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв).

Попри аналогію із результатами аналізу впливу переднього кута інструменту на силу різання при обробленні алюмінієвого сплаву з конструкційними та легованими сплавами, в даному випадку спостерігається початкове різке зростання сил різання (до 0,5 мс), і наступне їх вирівнювання (від часу 1,5 мс), як результат подолання енергетичного бар'єру при перетворенні сили пружності у сили пластичного деформування та руйнування. Пояснення цього явища подано у попередньому розділі. Крім того, можна відзначити, що суттєвого ефекту від збільшення переднього кута, що перевищує значення $\gamma > 5^\circ$ не спостерігається. Натомість, з літератури [327] відомо, що в цих умовах відбувається активне наростоутворення на передній поверхні

інструмента, що вкрай негативно позначається на формуванні мікрорельєфу оброблюваної поверхні. Отже, найбільш ефективний діапазон використання передніх кутів при обробленні деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів, є в межах $\gamma = 0...5^\circ$, що цілком корелюється з рекомендаціями [89, 90].

На Рис.3.22 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента γ при обробленні нікелевого жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718⁵) (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв) (Додаток Г4).

В даному випадку зростання сили різання при зменшенні кута γ від 5° до 0° є набагато більшим і становить приблизно 45% в зоні усталеного різання. Такий різкий стрибок сили різання можна пояснити тим, що разом із зростанням навантаження стімка зростає і температура в зоні різання, причому при порівнянні температурних полів при обробленні сталі 20 і жароміцного сплаву ХН60Ю (режими різання - подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв), можна зробити висновок, що температура в зоні різання жароміцного сплаву на 50% вище від температури при обробленні сталі 20. Таке явище обумовлено, в основному, високим відсотком вмісту нікелю у сплаві. Мала теплопровідність нікелевого сплаву ХН60Ю призводить до підвищеної температури в зоні контакту, а отже, до активізації явищ адгезії і дифузії, інтенсивного схоплювання контактних поверхонь і руйнування різальної частини інструменту. Основою різкого зростання силових чинників є здатність хромонікелевих сплавів зберігати початкову міцність і твердість при підвищених температурах, що призводить до високих питомих навантажень на контактні поверхні інструменту в процесі різання. Сплав ХН60Ю при температурі 20°C має $\sigma_B=680...700$ МПа, а при температурі 800°C $\sigma_B=610...630$ МПа [232].

⁵ Стандарт США ASTM 915, євростандарт EN 10363-3, стандарт Японії – JIS G4051.

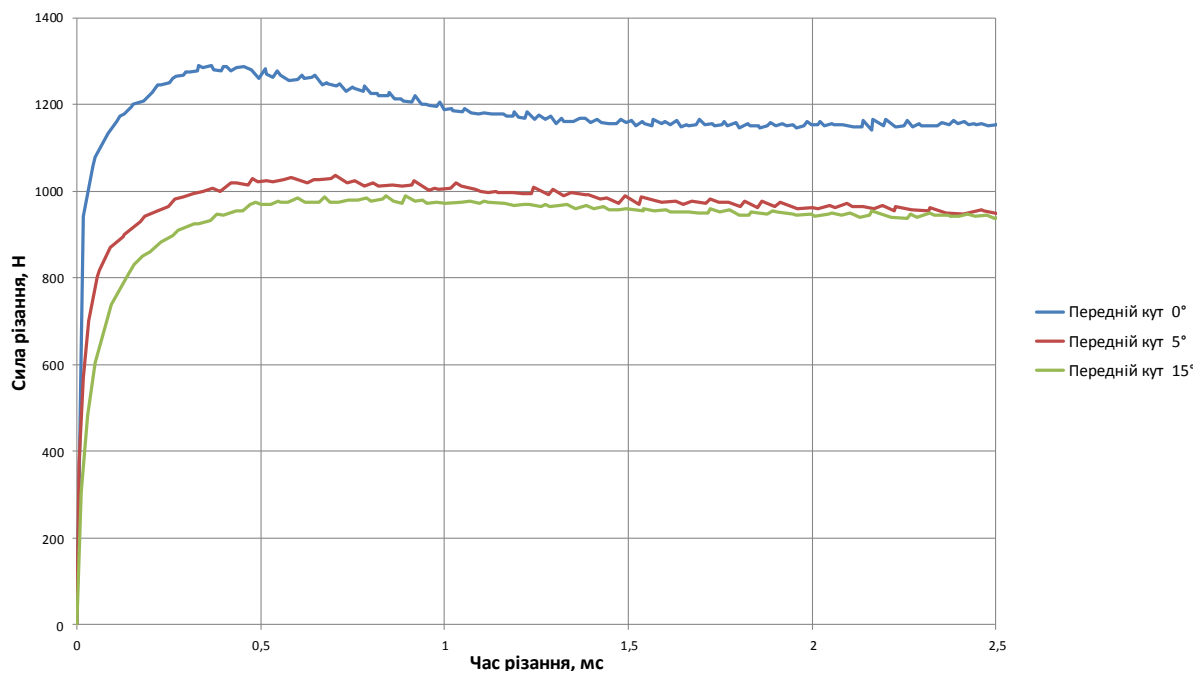


Рис.3.21. Графік залежності сили різання від переднього кута γ при обробленні алюмінієвого сплаву АД33, визначеної на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

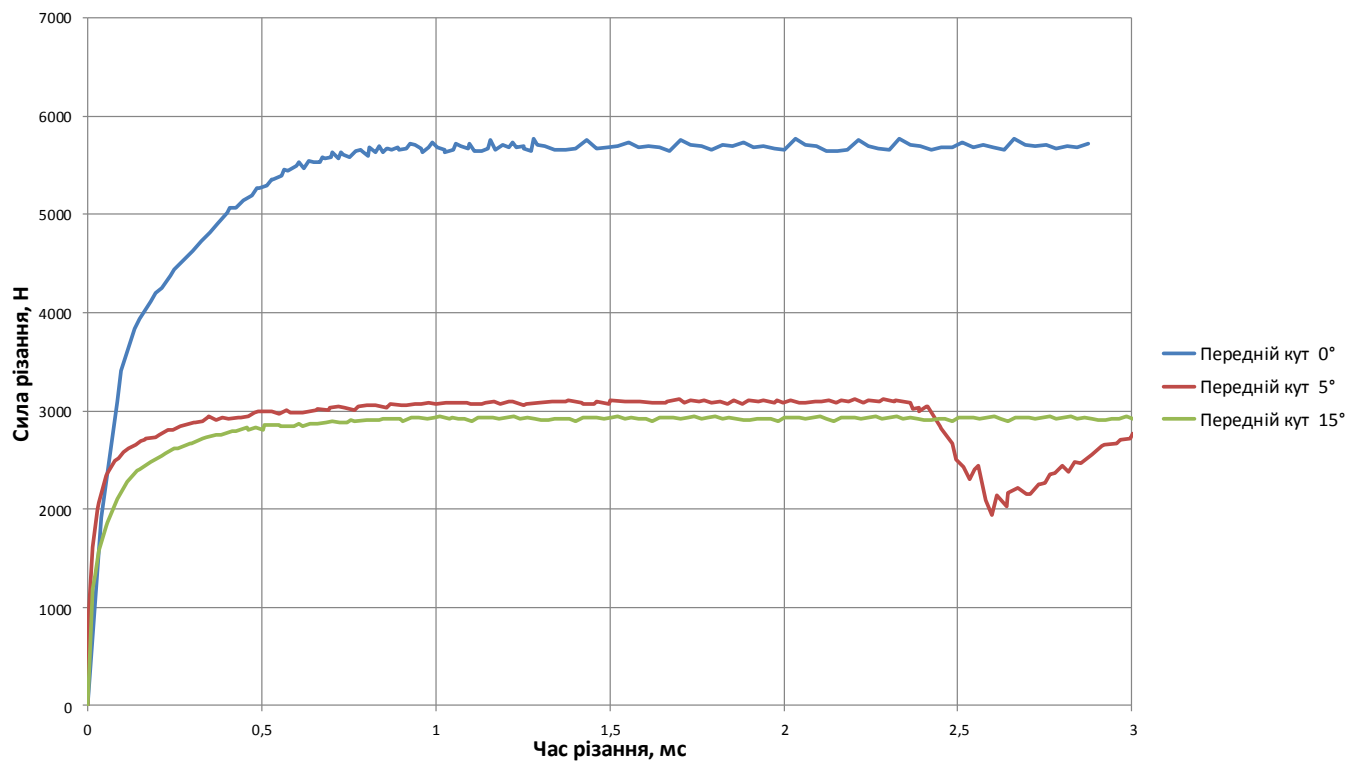


Рис.3.22. Графік залежності сили різання від переднього кута γ при обробленні жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718), визначеної на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

Тобто, міцність цього сплаву ХН60Ю зі збільшенням температури до 800°C зменшується лише на 10-12%, тоді як міцність сталі 45 при цій же температурі знижується в 3-5 разів. Це незначне зменшення міцності матеріалу при нагріві в процесі різання призводить до високих питомих навантажень на передню поверхню різальної частини інструменту — від 5000 Н при великих подачах, і до 9000Н при малих, що у декілька разів перевищує ці значення для звичайних конструкційних сталей і відповідає обробленню загартованих сталей з HRC 60...64 [135].

На Рис.3.23 наведені графіки залежності сил різання від величини переднього кута різального інструмента γ при обробленні титанового сплаву ВТ6 ГОСТ 19807-91 (аналог Ti6Al4V) (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв) [282].

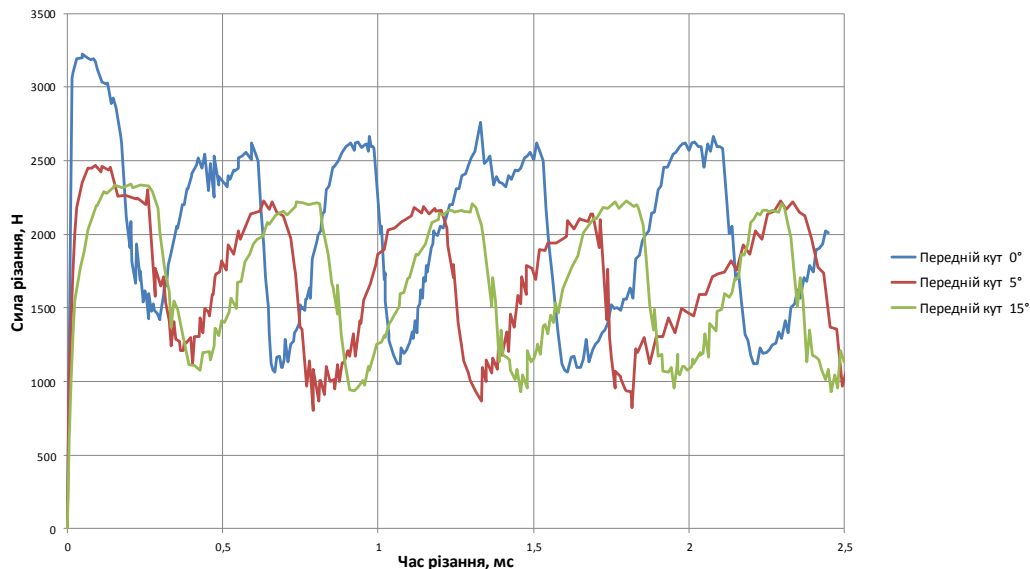


Рис.3.23. Графік залежності сили різання від переднього кута γ при обробленні титанового сплаву ВТ6 ГОСТ 19807-91 (аналог Ti6Al4V), визначеної на основі аналізу реологічної імітаційної моделі в системі Deform 2D

В даному випадку не спостерігається значного зростання сили різання в залежності від зменшення переднього кута γ (при зменшенні γ з 5° до 0° сила різання зростає на 15...20%, а при зменшенні γ з 15° до 5° сила різання взагалі практично не змінюється). Проте із збільшенням γ зростає частота коливань зон адіабатичного зсуву. Як це було описано вище, мала пластичність титанових сплавів призводить до того, що при їх обробленні утворюється зубчастоподібна стружка, що на вигляд схожа

на зливну, але має тріщини, які розділяють її на дуже слабо деформовані елементи, міцно пов'язані між собою тонким і сильно деформованим контактним шаром. Утворення такої форми стружки пояснювалося тим, що із зростанням швидкості різання пластична деформація не встигає протікати в основному об'ємі, концентруючись в контактному шарі, де виникають високі тиски і температури. У той же час титанові сплави мають ще гіршу теплопровідність, ніж жароміцні сталі і сплави; внаслідок цього при різанні, наприклад, титанового сплаву ВТ6 виникає в середньому в 2,2 рази більша температура, ніж при обробленні сталі 45. Тому температура в зоні різання внаслідок низької теплопровідності титаномістких матеріалів продовжує залишатися високою, викликаючи тим самим структурні перетворення і активну взаємодію з повітрям. В результаті знижених пластичних властивостей титанових сплавів має місце утворення в процесі деформації випереджаючих макро- і мікротріщин. Це пояснює також утворення при різанні титанових сплавів великих кутів зсуву ($\phi=38^\circ \dots 44^\circ$) з малою усадкою стружки (як правило, коефіцієнт усадки її по довжині близький до одиниці) [232, 282, 327].

3.4. Аналіз результатів імітаційного (реологічного) моделювання щодо впливу температурних чинників на стан поверхонь в процесі їх формоутворення

Один з найголовніших чинників, що визначають напружено-деформований стан в зоні формоутворення поверхонь деталі та стружкоутворення - це теплові явища, що виникають в результаті роботи різання. Закони теплоутворення пояснюють ряд явищ, пов'язаних з силовими параметрами процесу різання, стійкістю інструмента та якістю обробленої поверхні. З метою побудови ефективної структури та параметрів технологічної операції, необхідно змоделювати теплофізичну реологічну картину різання і на цій основі проаналізувати, яким чином динамічні показники температурних деформацій впливають на якість оброблюваної поверхні та дослідити вплив термодинамічних показників на напружено-деформований стан заготовки та інструмента, а відтак на формування залишкових напружень та деформацій, що мають визначальний вплив на параметри втомної міцності, зносостійкості та корозійної стійкості функціональних поверхонь виробу.

Теплота Q_{Σ} в процесі різання утворюється в результаті [241, 242]: внутрішнього тертя між частками оброблюваного металу в процесі деформації Q_1 ; зовнішнього тертя стружки об передню поверхню інструменту Q_2 ; зовнішнього тертя поверхні різання і обробленої поверхні об задню поверхню інструменту Q_3 ; відриву, деформації стружки та її диспергування Q_4 .

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 .$$

Найбільш інтенсивне виділення тепла відбувається в області стружкоутворення, прилеглий до площини зсуву. В цій області теплота виділяється в результаті двох одночасно протікаючих процесів: по-перше, в результаті пластичної деформації зсуву елементів новоутвореної стружки по площині сколювання; по-друге, в результаті пластичної деформації стиску і частково зсувної пластичної деформації, що примикає до площини з боку зрізаного шару припуску (Рис.3.24). Пружна деформація завжди передує пластичній деформації при різанні металів [117, 241, 327] (Рис.3.24). При цьому кількість тепла, що виділяється в результаті пружної деформації є відносно незначною, але нехтувати впливом цього процесу на теплофізичні характеристики процесу різання є неприпустимим. Нижче буде пояснено вплив даного чинника на формування температурних полів для різних матеріалів.

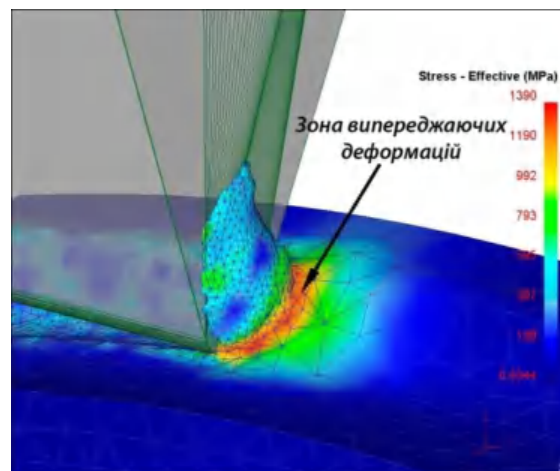


Рис.3.24. Фрагмент 3D моделювання пружно-пластичної деформації заготовки, що утворюється перед площиною зрізу

З іншої сторони, тепло, що утворюється в процесі різання, не акумулюється в місцях його генерування, а градієнтно поширюється від зон з більш високою температурою до зон з нижчою температурою. Причому, згідно законів

термодинаміки, інтенсивність такого потоку ($\frac{\partial T}{\partial x}$) тим вища, чим більша температурна різниця або менша відстань між окресленими зонами термічного впливу. Із зони різання тепло відводиться із стружкою (q_1), передається в заготовку (q_2) і інструмент (q_3) і поширюється в навколишнє середовище (q_4) (Рис.3.25). Тепловий баланс процесу різання може бути виражений рівнянням:

$$Q_{\Sigma} = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 .$$

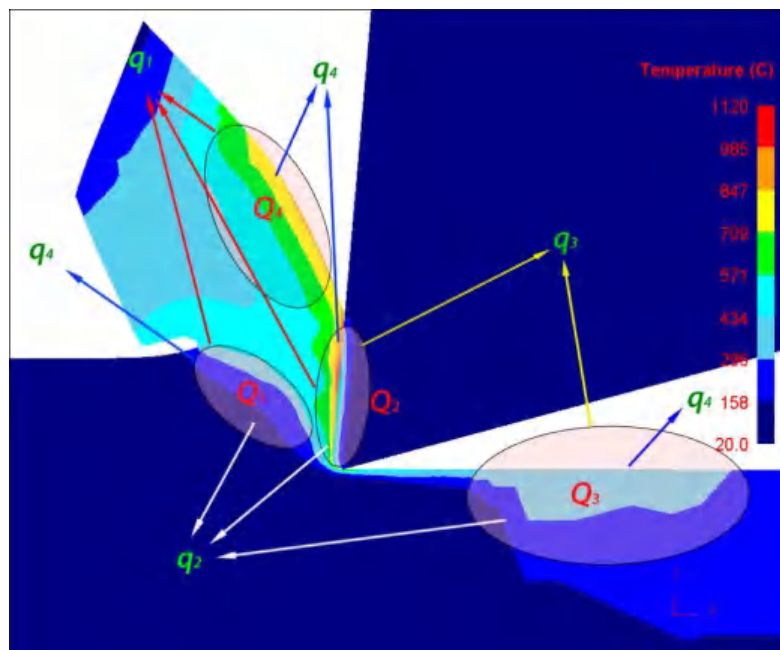


Рис.3.25. Схема поширення та акумулювання джерел тепла в зоні різання

Наприклад, найбільша кількість теплоти Q_1 , що утворюється внаслідок деформації залишається в стружці (q_1) і частково поглинається оброблюваною деталлю q_2 . Теплота тертя стружки Q_2 залишається в основному в стружці (q_1) і частково (3-5%) спрямовується в інструмент (q_3). Теплота тертя по задніх гранях інструменту Q_3 спрямовується в деталь (q_2) і різець (q_3). При обробленні металів з низькою теплопровідністю, наприклад жароміцних і титанових сплавів, в різець відводиться до 20-40% усієї теплоти [241]. Теплота диспергування стружки Q_4 практично повністю поглинається стружкою (q_1) або виводиться у навколишнє технологічне середовище (q_4) – мастильно-охолоджувальну рідину або в атмосферу. Втрати теплоти від конвекції і радіації в процесі різання дуже малі; невелика кількість теплоти, що йде в

деталь, оскільки стружка дуже швидко формується в зоні різання і так же швидко проходить зону контакту з різцем.

Співвідношення кількості тепла, що відводиться із стружкою в деталь, в інструмент і зовнішнє середовище, суттєво залежить від механічних властивостей оброблюваного матеріалу, режимів різання, геометрії різального інструменту і зовнішніх умов, в якій здійснюється процес різання.

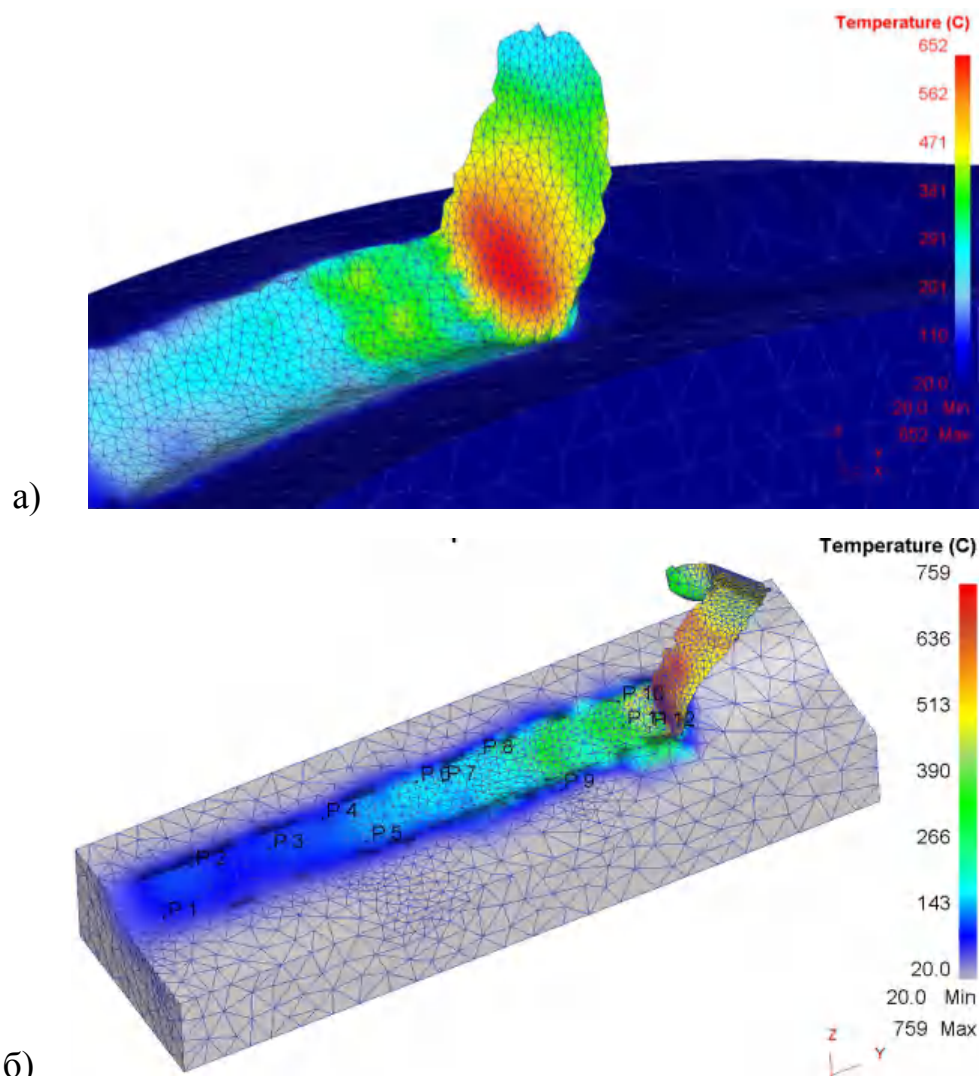


Рис.3.26. Результати реологічного моделювання зони концентрації теплового поля на передній поверхні різця (а) та вздовж обробленої поверхні заготовки (б) (інструмент умовно не показаний) в системі Deform 3D

Припускаючи, що механічна робота різання повністю переходить в теплоту, отримаємо:

$$Q = P_x \cdot V , \quad (3.11)$$

де Q — кількість теплоти в Дж.

Проте, в реальних умовах в теплоту перетворюється не уся робота різання: невелика частина її переходить в потенційну енергію спотвореної кристалічної ґратки. Тому в повному вигляді формулу записати наступним чином:

$$Q = P_x \cdot V \cdot \alpha_0 \quad (3.12)$$

де α_0 — коефіцієнт, що враховує втрати, пов'язані з деформацією кристалічної структури матеріалу.

Для якісного та адекватного аналізу впливу температурного поля на процес різання, важливо знати не лише кількість теплоти, але і розподіл її, тобто міру концентрації теплоти в різних ділянках виробу, стружки і інструменту. З іншої сторони, якби вся теплота, що утворюється, швидко і рівномірно розподілялася по деталі та інструменту, то це призвело б до рівноваги у процесі різання, забезпечувало би термодинамічну стабільність та рівномірне зношування інструменту. Насправді процес протікає інакше: велика кількість теплоти концентрується в певних зонах, суттєво підвищуючи їх температуру. Тут неминуча втрата різцем твердості, його затуплення і навіть можлива металографічна структурна зміна шару обробленої поверхні. Визначення градієнту поширення температури вкрай важливе. Так, проф. Малкин А. Я. вважає, що регулюванням потоку теплоти можна впливати на процес різання в сприятливу сторону і тим полегшити роботу інструменту і підвищити якість обробленої поверхні [193].

На основі реологічного імітаційного моделювання процесу теплоутворення можна виявити закони зміни температури різання (на поверхні контакту стружки з передньою гранню різця), а також температури різального інструменту і оброблюваної деталі залежно від різних чинників та співставити отримані дані з результатами теоретичних і експериментальних досліджень.

Приймаючи до уваги вищенаведене твердження, що найбільше генерування тепла відбувається в результаті внаслідок тертя стружки по передній поверхні, визначаємо отримаємо роботу деформації стружки (Рис.3.19):

$$R_D = P_{xf}V - P_T V \frac{1}{\xi}, \quad (3.13)$$

де V - швидкість різання;

ξ — усадка стружки.

Оскільки $P_T = P_X \sin \gamma + P_Y \cos \gamma$ (нехтуємо силою тертя по задній поверхні різця) і, отже, робота деформації стружки

$$R_D = P_X V \left[1 - (\sin \gamma + \mu_0 \cos \gamma) \frac{1}{\xi} \right] \quad (3.14)$$

де $\mu_0 = \frac{P_f}{P_T}$.

Теплота роботи сили тертя по передній грані в одиницю часу становить:

$$Q_2 = \frac{P_T V}{\xi}. \quad (3.15)$$

Щоб визначити температуру на передній поверхні різця, отриману в результаті тертя стружки, розглядатимемо різець як твердий стержень з поперечним перерізом, рівним bl , на одній стороні якого підтримується постійна температура T_p [185]. Для вирішення поставленого завдання використовується рівняння теплопровідності [185, 296, 318]:

$$\frac{\partial T_p}{\partial \tau} = \omega \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \quad (3.16)$$

де $\omega = \frac{\lambda}{c\rho}$ — температуропровідність;

λ — теплопровідність різця;

c — теплоємність різця;

ρ — густина;

τ — час, протягом якого стружка проходить площу контакту завдовжки l :

$$\tau = \frac{l}{V_{СТР}} = \frac{l\xi}{V} \quad (3.17)$$

Вирішуючи рівняння по М. П. Левицькому [94, 182], за початкових і граничних умов $T_x = T_p$ при $x = 0$, $T_p = 0$ при $\tau = 0$, отримаємо рівняння:

$$T_{\tau,x} = T_P \left(\frac{x}{\Delta} - \frac{2}{\pi} e^{\frac{\pi^2 \sigma^2}{\Delta^2}} \sin \frac{\pi x}{\Delta} \right), \quad (3.18)$$

де $T_{\tau,x}$ — температура, що виникає від теплоти тертя в цій точці і в даний момент часу τ ;

Δ — глибина, на яку проникає теплота тертя за час τ .

Слід зауважити, що температура різання насправді має бути більш високою, ніж це виходить обчисленням за теоретичними формулами, оскільки тут не врахована теплота, що виділяється внаслідок тертя заготовки по задній поверхні різця. Остання складова матиме більше значення із збільшенням швидкості різання і по мірі затуплення різця; при цьому особливо помітно підвищуватиметься температура оброблюваної деталі [232]. Оброблювана деталь нагрівається в основному теплотою деформації. Очевидно, що температура деталі повинна зменшуватися зі збільшенням швидкості різання, оскільки при цьому зменшується T_D . Цей висновок, що впливає з аналізу формули (3.24) підтверджується на практиці при обробленні деталі загостреним різцем в нормальних умовах [241, 242]. Проте, по мірі затуплення інструменту і значного зменшення заднього кута α і кута в плані φ ситуація змінюється. У цьому випадку зі збільшенням сили тертя помітно ростуть робота і теплота тертя по задній поверхні різця, і тому температура деталі підвищується зі збільшенням швидкості різання V . В той же час температура оброблюваної деталі зменшується зі збільшенням подачі S . Це цілком закономірно, оскільки із збільшенням подачі сила тертя на задній поверхні різця залишається майже незмінною, але при певній довжині деталі скорочується відносний шлях різця (час оброблення) і, отже, зменшується робота сили різання.

Теоретичний розрахунок температури різання не завжди є адекватним, оскільки у відповідних розрахункових формулах незалежні змінні є взаємозалежними параметрами. Так, теплоємність c збільшується, а теплопровідність λ зменшується із зростанням температури. Довжина контакту стружки і різця зменшується зі збільшенням швидкості різання, але помітно росте по мірі зношування інструменту. Значення коефіцієнтів $(\alpha_0, \beta_0, \mu_0)$ також змінюються залежно від різних чинників. Крім

того, температура в зоні різання залежить і від умов процесу різання, використання мастильно-охолоджувальних рідин тощо. Тому для розрахунку температури різання частіше користуються емпіричними формулами, що показують закономірності зміни температури різання залежно від різних чинників і є адекватними в певних межах і умовах [64, 69].

У зв'язку з цим, використання імітаційних реологічних моделей дозволяє найбільш реально спрогнозувати термодинамічний стан заготовки та інструменту у швидкозмінних умовах різання, особливо на перехідних етапах – врізання інструменту, швидка зміни напрямку подачі тощо. З метою перевірки адекватності вищенаведених теоретичних положень, у системі Deform 2D проведено реологічне імітаційне моделювання процесу точіння при швидкості різання $V=100$ м/хв. Матеріал заготовки – сталь 45. Матеріал інструменту – вольфрамо-кобальтовий сплав ВК6.

В результаті моделювання підтверджено, що найбільша кількість теплоти виділяється в стружку (Рис.3.27).

Аналогічна картина розподілу температурних полів відбувається при фрезеруванні деталі зі сталі 45 (Рис.3.28)

Найбільша температура інструмента, що зосереджена поблизу передньої поверхні різального леза, обумовлена інтерференцією основних джерел теплоти - Q_1, Q_2, Q_3 . На Рис.3.29 представлено температурне поле стружки і різця, отримане в результаті реологічного моделювання процесу оброблення заготовки зі сталі 45 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв). Ізотерми в зоні стружкоутворення розташовані орієнтовно паралельно поверхні зсуву, а у різця майже концентрично навколо передньої поверхні різального леза. В цьому випадку, згідно теорії теплопровідності, теплові потоки мають бути спрямовані нормально ізотермам. У схемі на Рис.3.29 (а) вони показані відповідними векторами: D — в деталь; S — в стружку; I — в різець. Слід зауважити, що ці дані, графічна інтерпретація яких подана на Рис.3.29, цілком корелюються з теоретичними положеннями [94, 232, 241, 242].

В зоні стружкоутворення найбільш високі температури спостерігаються поблизу різальної кромки і в зоні наросту. Насправді положення складніше, оскільки

температура різання залежить ще від довжини контакту поверхні різання і стружки по задній і передній поверхнях інструменту [234]. Чим менше довжина контакту на задній поверхні, тим нижче середнє значення температури різання і тим ближче до різальної кромки розташовується її максимум. При обробленні конструкційних сталей зі швидкістю $V > 100$ м/хв температура в зоні різання доходить до 800°C , а на поверхні тертя по передній грані досягає навіть 1200°C .

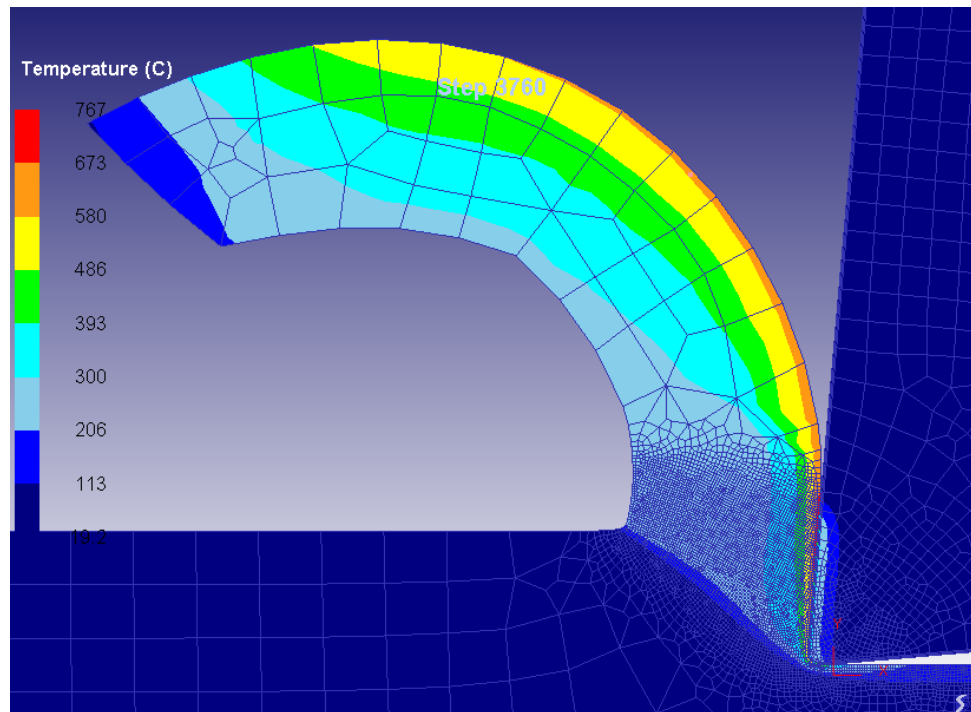


Рис.3.27. Розподіл тепла між стружкою, інструментом і деталлю при швидкості різання 100 м/хв

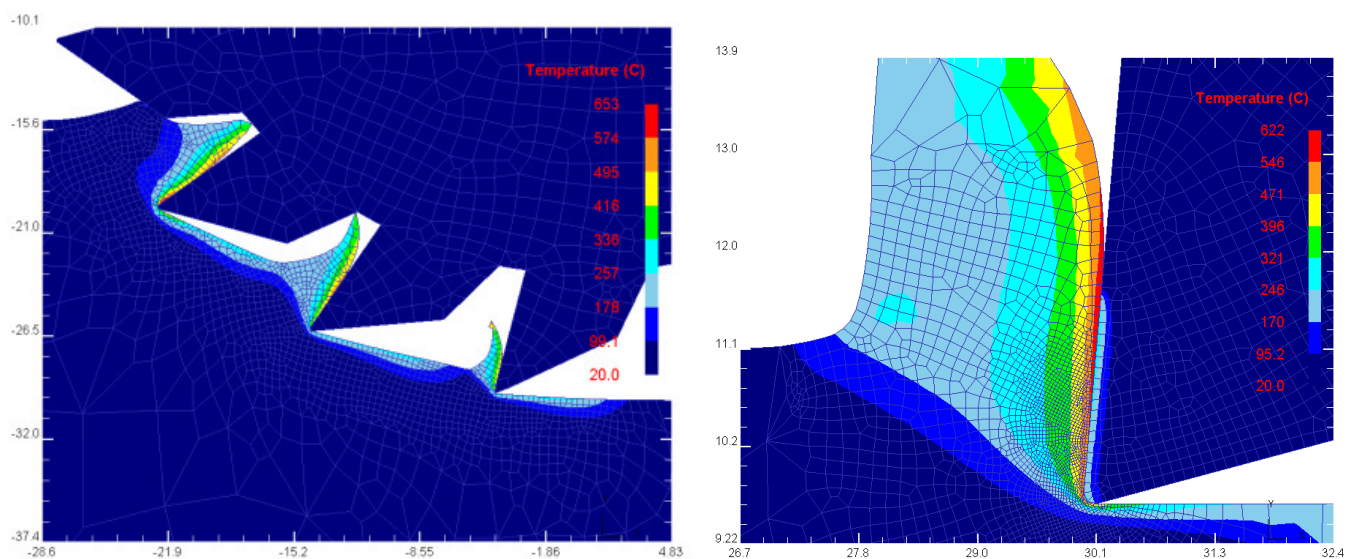


Рис.3.28. Хромографічні картини температурних полів при фрезеруванні сталі 45, отримані в результаті реологічного моделювання в системі Deform 2D

На Рис.3.30 показана картина температурних полів при обробленні заготовки зі сталі 20. У системі DEFORM реалізуються 2 моделі тертя: «внутрішнє» - зсувне (shear) і «зовнішнє» - сухе тертя, що визначається за законом Амонтоно-Кулона (coulomb). При зсувному терті слід використати коефіцієнти, що розраховуються по формулі $f = mk$ (m - коефіцієнт тертя; k - межа текучості при зсуві). Для сухого тертя використовується коефіцієнт, що розраховується за формулою $f = mp$ (m - коефіцієнт тертя; p - довжина контакту між двома об'єктами). Аналіз реологічного експерименту дозволив зробити висновок про те, що зона максимальної температури стружки майже повністю відповідає області, де стружковий елемент в зоні контакту з різцем підлягає пружним деформаціям, де використовується сухе тертя (відрізок ВС), в той час коли область пластичних деформацій (на ділянці АВ реалізована модель зсувного тертя) нагрівається значно менше (для даного експерименту – приблизно на 100°).

Очевидно, що зі зменшення довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструмента середня температура є більш концентрованою, а максимум температури віддаляється від різальної кромки (Рис.3.31). Це має істотне значення для стійкості різального інструменту і точності оброблення деталі, залежної від температурної деформації різця.

З метою аналізу впливу швидкості різання на температуру в зоні стружкоутворення, змодельовано процес точіння заготовки, виготовленої зі сталі 45 при швидкостях різання: 100 м/хв, 150 м/хв, 200 м/хв, 250 м/хв, 300 м/хв інструментом з вольфрамо-кобальтового сплаву ВК6.

З Рис.3.32 видно, що температура різання росте менш інтенсивно, ніж швидкість. По мірі нагрівання інструменту різниця температур стружки і різця зменшується, а тому зменшується і інтенсивність теплопередачі від стружки до різця. Отже, зі збільшенням швидкості різання V температура різця значно піднімається, але у меншій мірі, ніж швидкість. Сучасні експериментальні дослідження процесу різання високоміцних сталей з ультрависокими швидкостями (до 72 000 м/хв), що процес відбувався майже адіабатично (без теплообміну) [11]. Таке явище супроводжується різким зниженням сил різання і значним окрихчуванням металу в зоні різання. Цей процес сприяє швидкому відриву стружки при повній відсутності пластичної

деформації (усадки) стружки. Причому негативна усадка (видовження стружки), викликана відцентровими силами при дуже великих швидкостях.

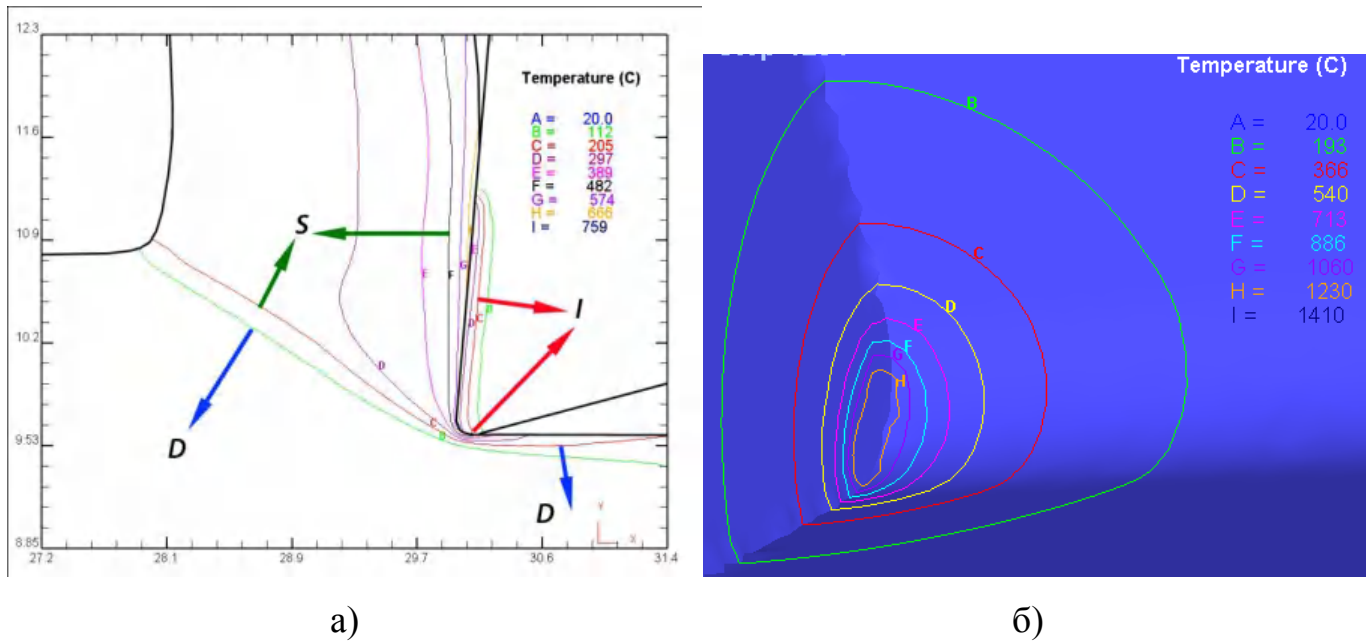


Рис.3.29. Температурні поля стружки (а) і різця (б), отримані в результаті моделювання процесу оброблення заготовки зі сталі 45 ($S=0,25$ мм; $t=1$ мм; $V=120$ мм/хв) в системі DEFORM 2D.

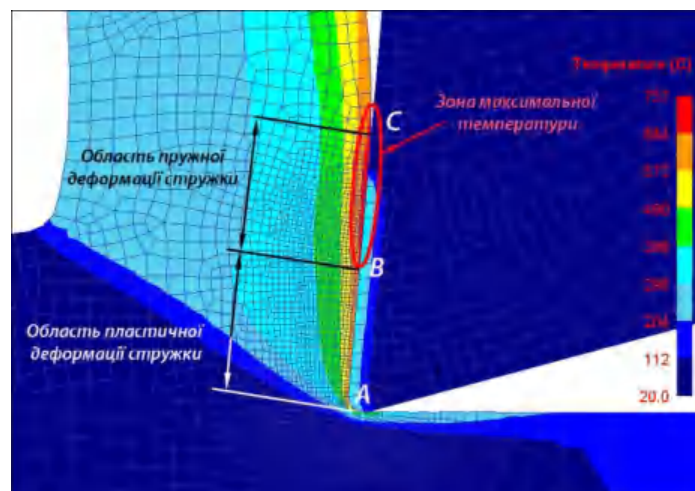


Рис.3.30. Розподіл температурних полів в зоні контакту стружки і передньої поверхні інструменту.

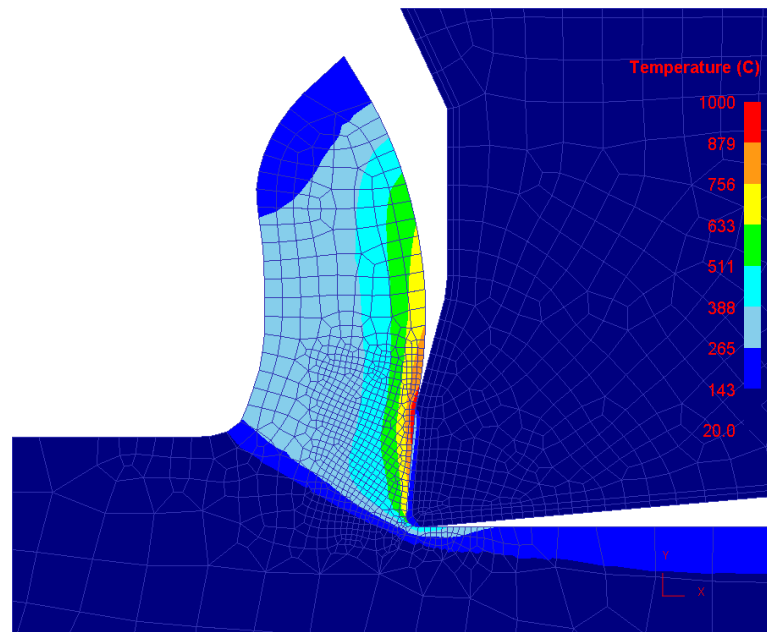


Рис.3.31. Хромографічна картина, що демонструє вплив зменшення довжини контакту стружки з передньою поверхнею на розподіл температурних полів у інструменті та заготовці.

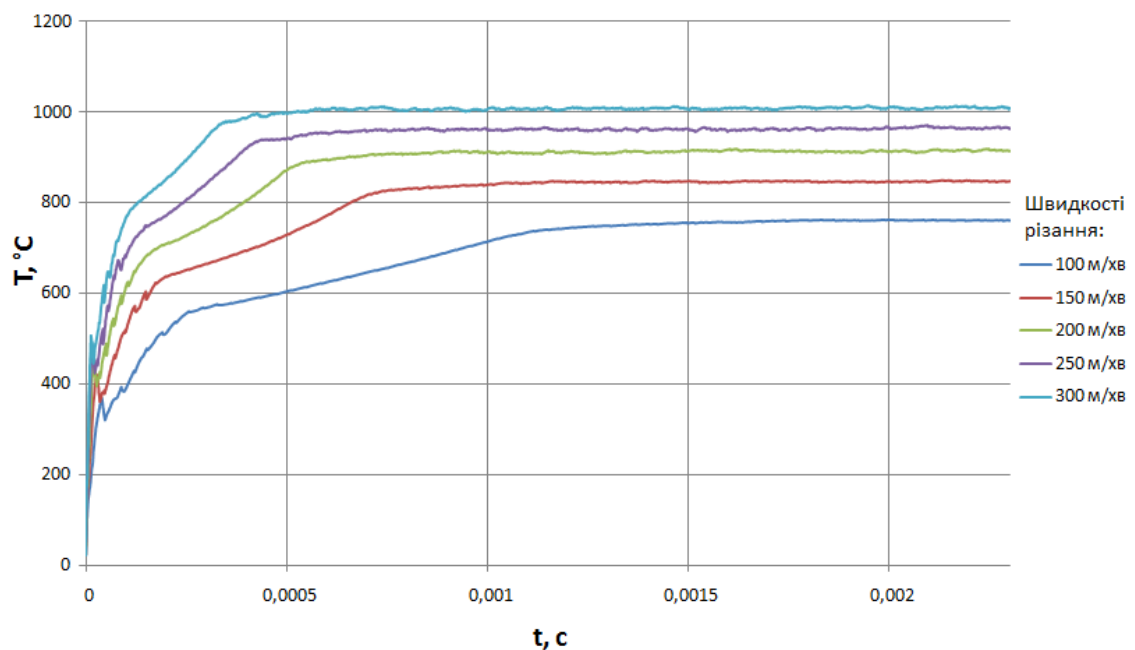


Рис.3.32. Графіки залежності температури від швидкості різання

Не складно передбачити залежність між глибиною різання t , подачею S і температурою, якщо розглянути зміну приросту і відведення теплоти в інструменті зі зміною t і S . Із збільшенням подачі зростає тиск стружки на різець, а разом з ним і робота деформації. Але при цьому, як відомо, усадка стружки зменшується і, отже,

робота деформації, що доводиться на одиницю об'єму стружки, також зменшується. До того ж тертя на задній поверхні інструменту зі збільшенням подачі мало змінюється. Тому кількість теплоти, що утворюється в стружці, збільшуватиметься у меншій мірі порівняно зі збільшенням подачі. В той же час з потовщенням стружки відведення теплоти покращується, оскільки площа контакту стружки з різцем розширюється. В результаті температура різання підвищується зі збільшенням подачі, але у меншій мірі, чим при підвищенні швидкості.

Ще менше впливає на температуру значення глибини різання, оскільки навантаження на одиницю довжини різальної кромки не змінюється. Із збільшенням глибини різання при постійному куті в плані φ пропорційно збільшується довжина різального леза, але й еквівалентно посилюється тепловідвід від неї. Отже, на одиницю довжини різальної кромки збільшення теплоти буде дуже незначним. В результаті температура мало зміниться зі збільшенням глибини різання. Для підтвердження цих теоретичних міркувань в системі DEFORM 2D була розроблена імітаційна модель, що дозволила проаналізувати вплив глибини різання на температуру в зоні стружкоутворення. Змодельовано процес точіння при глибинах: 0,1 мм, 0,4 мм, 0,7 мм, 1,0 мм, 1,3 мм. Підтверджено, що зі збільшенням глибини різання в усталеній частині процесу різання зростає температура в зоні стружкоутворення зростає, але тільки в діапазоні $S=0,1\dots0,4$ мм (на 20%). При більшому зростанні подачі різниця температур коливається в межах $50\dots70^\circ$, що становить 5-7% різниці. Таким чином, глибина різання, суттєво не впливаючи на температуру різання в заготовці, значно змінює температуру різального інструменту за рахунок зміни потужності теплових потоків. Зміна подачі супроводжується зміною температури різання, сил різання, інтенсивності зносу, а також довжини шляху різання пройденого різцем при обробці деталі. Тому вплив подачі на температуру інструменту виявляються також і в залежності від тривалості обробки. При короткочасній обробці зміна температури є наслідком зміни температури різання і величини теплових потоків, спрямованих в інструмент. При тривалій обробці на величину температури позначається також вплив зношування інструмента.

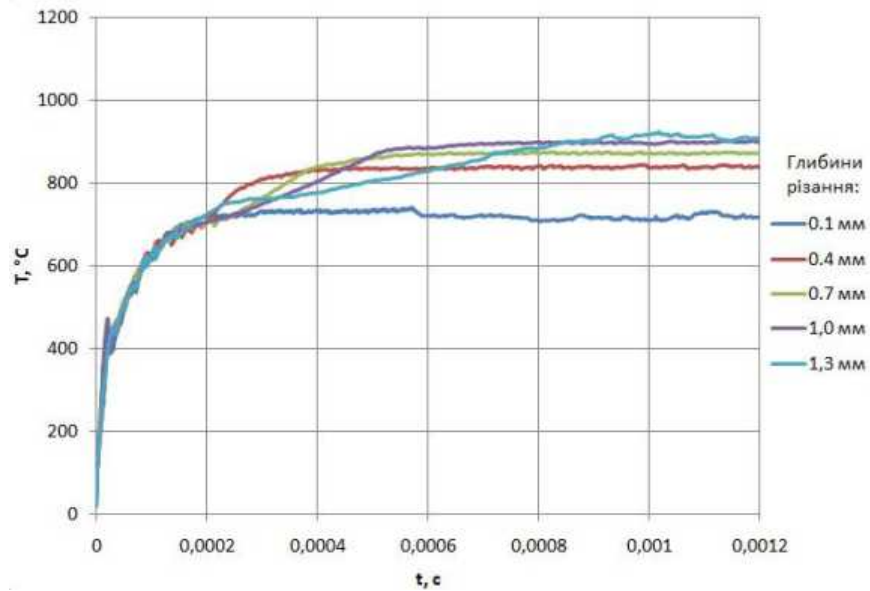


Рис.3.33. Залежність температурних показників від глибини різання

Ще одним важливим чинником технологічного середовища є коефіцієнт тертя стружки і інструменту, що визначається не тільки фізичною величиною пари інструментальний матеріал - матеріал заготовки, а й наявністю та впливом мастильно-охолоджувального середовища. Змодельовано процес точіння при коефіцієнтах тертя: 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7. Матеріал заготовки – сталь 45. Матеріал інструменту – ВК6. Підтверджено, що зі збільшенням коефіцієнта тертя практично пропорційно збільшується температура в зоні контакту (Рис.3.34).

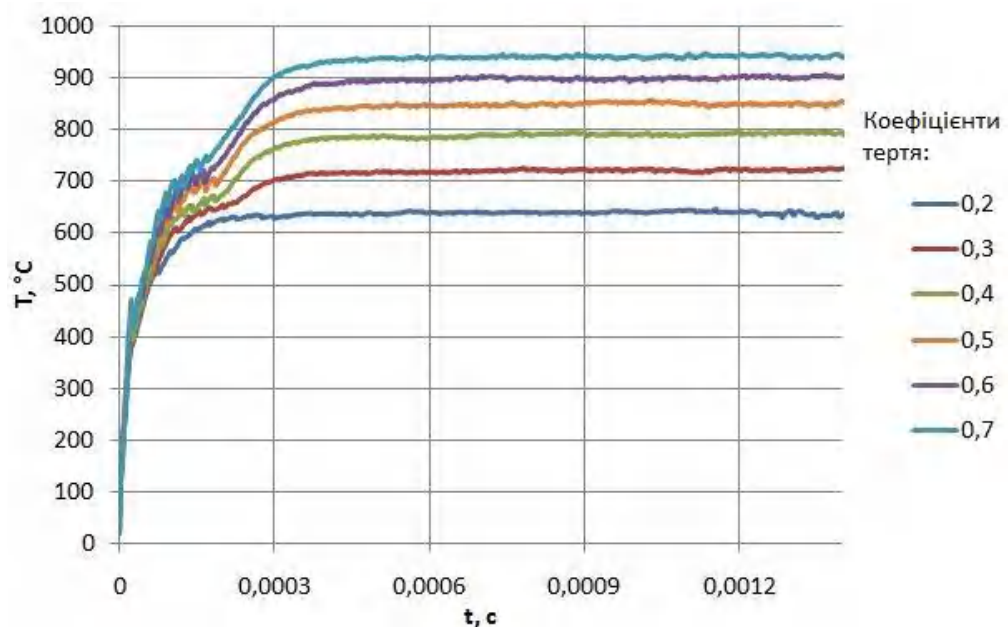


Рис.3.34. Залежність температури від коефіцієнта тертя

Очевидно, що суттєвий вплив на температурні поля в зоні різання має фізико-хімічні та механічні характеристики оброблюваного матеріалу (теплоємність, теплопровідність, густина, коефіцієнт тертя тощо). З метою аналізу впливу цих чинників на термодинамічні показники процесу різання проведені імітаційні реологічні дослідження при обробленні конструкційних сталей та сплавів, що представляють репрезентативний спектр машинобудівних матеріалів (Рис.3.35). Так, при різанні більш крихких металів, наприклад сталі 45, коли робота пластичної деформації є меншою і питомі сили різання відносно незначні, температура різання помітно нижче (на 20%), ніж при обробленні сталі 20. Низька температурна провідність жароміцного хромонікелевого сплаву ХН60Ю спричинює концентрацію температури (до 1000°C) біля переднього різального леза і спричинює суттєві температурні деформації стружки та різального інструменту. Аналогічні висновки щодо температурних полів при обробленні титанового сплаву ВТ6. В даному випадку суттєві коливання температур (10...12%) пояснюється адіабатичним процесом стружкоутворення. При цьому тепло, що виділяється в результаті роботи пластичної деформації, локалізується у вузькій зоні; деформація зсуву стає локально концентрованою, а стружка - суглобистою, циклічною, елементною. При обробленні алюмінієвого сплаву АД33 температура різання є порівняно низькою (приблизно 360°C) не лише через незначне навантаження, але і внаслідок великої теплопровідності кольорових металів, в даному випадку алюмінію.

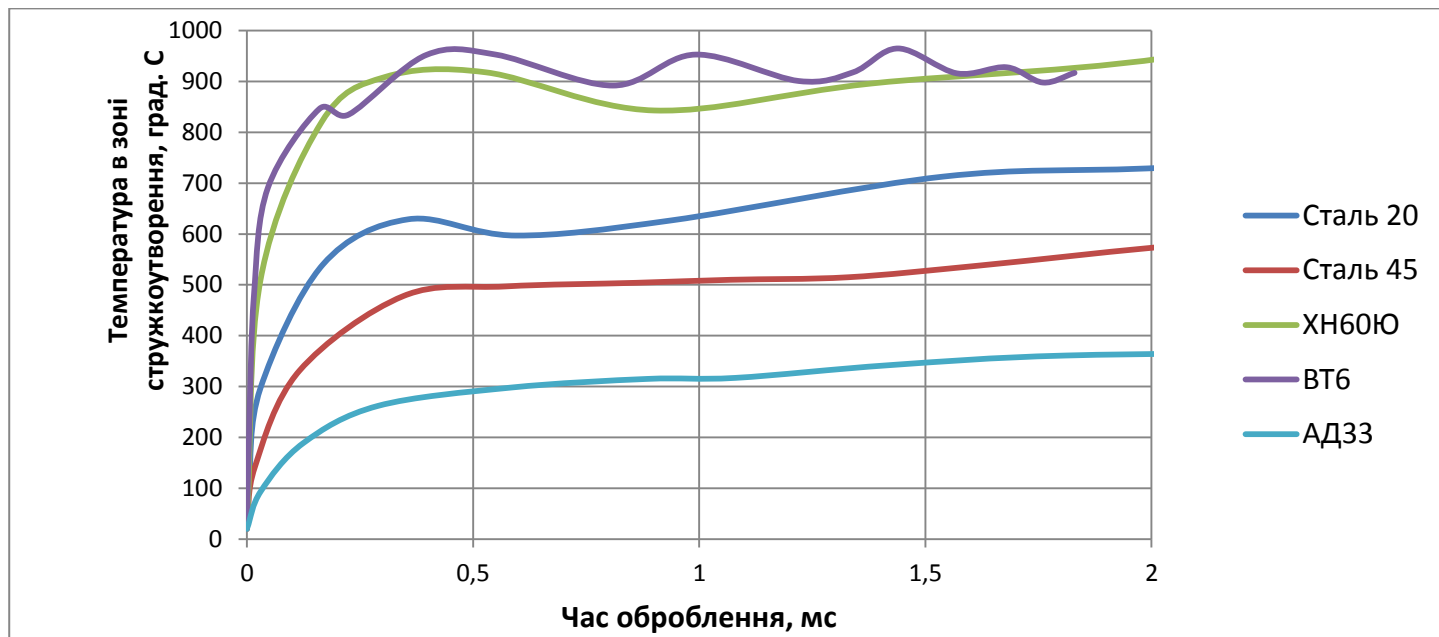
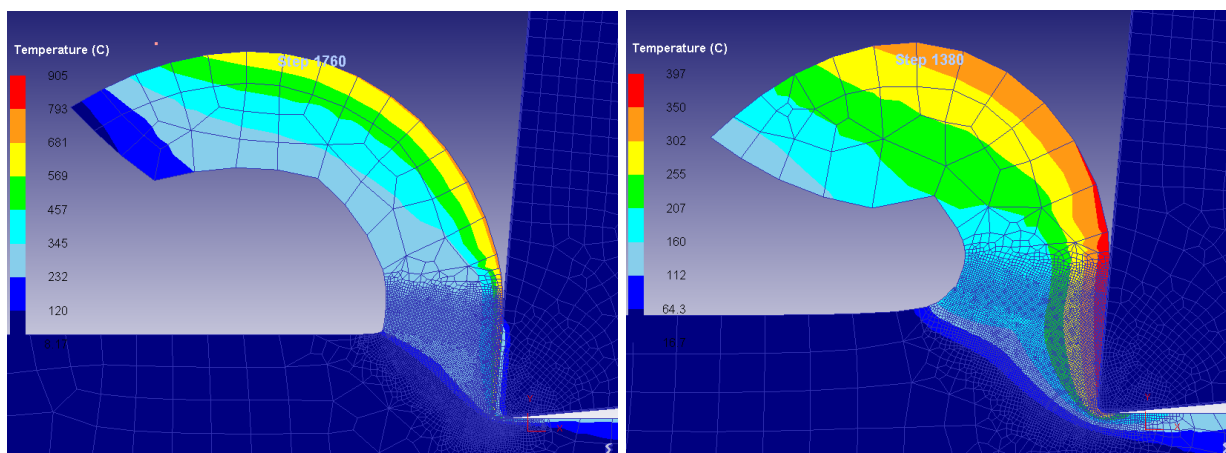


Рис.3.35. Графіки залежності температурних показників різання від фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу



а)

б)

Рис.3.36. Теплові поля в зоні стружкоутворення:

а) оброблення сталі 45; б) оброблення алюмінієвого сплаву AL 6061

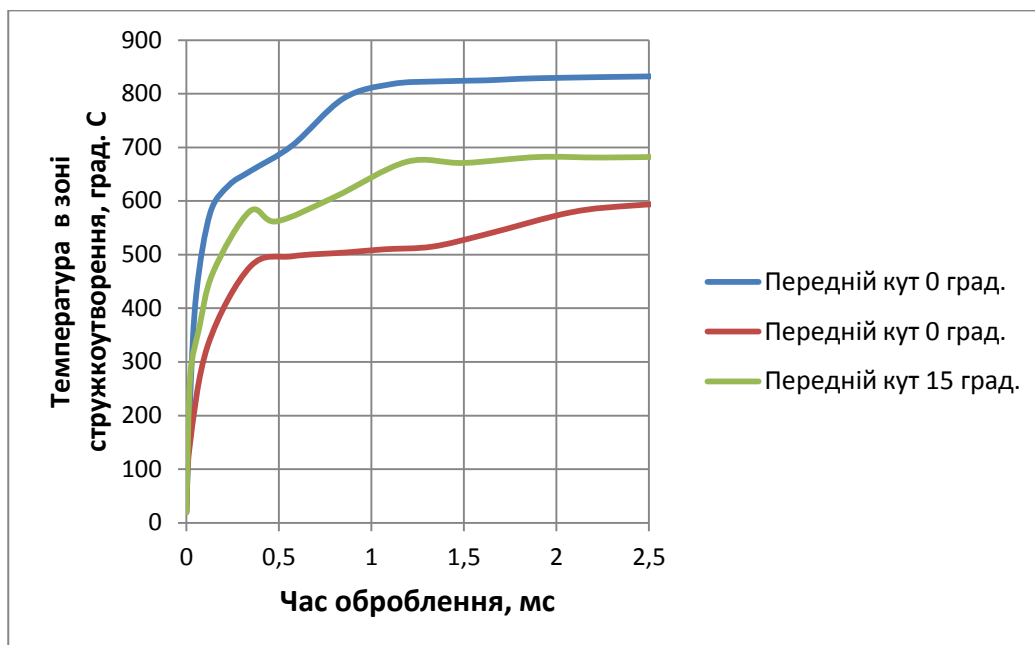


Рис.3.37. Графіки залежності температурних показників різання від геометрії різального інструменту

Таким чином, геометрія різального інструменту має значний вплив на температуру різання. Вищенаведені дослідження (розділ 3.3) доводять, що із зменшенням переднього кута γ збільшується сила різання, отже підвищується кількість теплоти, що утворюється в зоні стружкоутворення і температура різання (Рис.3.37). Відведення тепла в даному випадку також посилюватиметься зі збільшенням кута клину β (кута загострення) але у меншій мірі, ніж теплоутворення, і в результаті температура буде зростати. Величина кута в плані φ також впливає на температуру різання. Зі зменшенням кута φ дещо збільшується навантаження на різець і, здавалося б, нагріваючи його повинен посилюватися. Проте насправді виходить зворотне: зі зменшенням кута φ видовжується різальне лезо, і, як наслідок, покращується тепловідведення.

Висновки до розділу 3

1. Аналіз впливу технологічних показників – подачі, швидкості, глибини різання є крайовими умовами задачі дослідження напружено-деформованого та термодинамічного стану заготовки при різанні, що матиме визначальне значення для функціонально-орієнтованого технологічного проектування. Проблемно-орієнтоване узагальнення та акцентовані висновки таких досліджень дозволять створити базу даних для формалізації прогностичної залежності найважливіших експлуатаційних характеристик виробу від структури та параметрів технологічного процесу його виготовлення. Тому важливою задачею є верифікація змодельованих термодинамічних процесів, що супроводжують формоутворення поверхонь, співставлення відомих положень теорії різання з результатами моделювання для їх подальшого опрацювання.

3. Для аналізу впливу різних чинників на реологічну картину різання проведені імітаційні дослідження з різними матеріалами, режимами оброблення та геометричними параметрами різального інструменту. Хімічний склад, механічні властивості, мікроструктура в першу чергу впливають на оброблюваність сталей та температуру в зоні різання. Крім того, на початку процесу різання в зоні формоутворення відбуваються інтенсивні перехідні процеси, що супроводжуються різкими перепадами силового та напружено-деформованого стану виробу і є джерелом автоколивань інструменту, втратою стійкості заготовки, термодформаційними явищами, які матимуть вплив на формування точнісних та інших експлуатаційних властивостей виробу в цілому.

3.1. При обробленні матеріалів з малим вмістом вуглецю (наприклад, сталь 20) стабілізація сил різання відбувається досить швидко - приблизно за час 1,0 мс. При цьому коливання радіальної складової P_x є незначними - приблизно 5-7% від складової сили різання, тому забезпечення високої якості обробленої поверхні за рахунок керованості режимами різання цілком допустиме. Оптимальним, з точки зору забезпечення періоду стійкості інструменту, вважають вміст вуглецю в сталі в межах 0,10...0,20 %. Вважається, що наявність у низьковуглецевих сталей ($C < 0,3\%$) пластинчастого перліта та дрібні феритні включення суттєво підвищують їх оброблюваність. При підвищенні в конструкційній сталі вмісту

вуглецю в межах 0,30...0,50% (що проілюстровано на прикладі оброблення сталі 45) спостерігається зростання часу стабілізації сил різання в 2,5 рази (до 2,5 мс) та помітне збільшення коливання радіальної складової P_x , що становить приблизно 15-17% від складової сили різання. Це суттєво ускладнює процес керуваності при забезпеченні високої точності оброблення.

З аналізу результатів реологічного моделювання процесів лезового оброблення високолегованих сталей можна зробити висновки, про те, що збільшення вмісту вуглецю в 3,5 рази (для вищенаведеного прикладу оброблення легованих сталей 10X17P13M2T та 34X2H2M) сприяє підвищенню сили різання на 20% (з 2,05 кН до 2,5 кН). Крім того, наприклад, для сталі 10X17P13M2T великий час стабілізації сил різання (3,5 мс) та значні макроколивання складової сили різання P_y ($\Delta P_y \approx 80$ Н, що становить приблизно 25-27% від радіальної складової сили різання) значно погіршують умови якісного оброблення поверхні, спричинюючи автоколивання інструменту. Основна причина цього – наявність у структурі цієї сталі 17% хрому, що викликає коагуляцію карбідних домішок при відпуску, значно знижує теплопровідність матеріалу, а отже створює проблеми ефективного теплообміну в зоні різання.

3.2. Аналіз результатів імітаційного реологічного моделювання процесів лезового оброблення алюмінієвих сплавів дозволяє зробити висновок про незначні коливання радіальної складової сили P_y (до 10%) і різкий спалах сил різання на початку врізання інструменту як результат подолання енергетичного бар'єру при перетворенні сили пружності у сили пластичного деформування та руйнування. Для більшості інших конструкційних матеріалів цей ефект також має місце, проте він не проявляється настільки явно, оскільки значення стабілізованих сил різання в декілька разів вищі.

3.3. Велика стираюча здатність жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів обумовлена наявністю в них фазових станів, коли утворюються інтерметалідні або карбідні включення. Останні, подібно до абразиву, сприяють посиленому зношуванню інструменту. В процесі пластичної деформації жароміцних і нержавіючих матеріалів відбувається виділення карбідів, твердість яких

наближається до твердості твердих сплавів вольфрамо-кобальтових та титано-кобальтових груп. Внаслідок цього різко зростає абразивна здатність жароміцних сплавів, особливо тих, що мають на нікелеву основу. Для таких матеріалів властивий значний розкид розмірів зерен, а також нерівномірність виділення карбідів і інтерметалічної фази після їх кування, штампування і особливо литва. Наявність таких зон призводить до різкого зростання сил різання і температури, що значною мірою обумовлює затуплення і руйнування різальних кромek інструменту. Аналіз імітаційних моделей оброблення виробів з нержавіючих і жароміцних матеріалів якісно та кількісно підтверджує теоретичні та експериментальні дослідження, що описані в роботах проф. Подураєва В.М., Жаркова І.Г., Ящеріцина П.І. та інш. Доведено, що внаслідок малої теплопровідності оброблюваного матеріалу теплота різання концентрується в зоні зняття стружки і сприяє активізації процесів адгезії і дифузії, викликаючи руйнування різальних лез інструменту. Ці явища разом з підвищеними абразивних і механічних властивостей нержавіючих і жароміцних матеріалів при високій температурі, а також змінна дія цих чинників, обумовлена вібраціями, інтенсифікують процес зношування різальних інструментів, що різко погіршують оброблюваність різанням цих сталей і сплавів в порівнянні із звичайними конструкційними сталями і чавунами. Швидкість різання з підвищенням жароміцності важкооброблюваних сталей і сплавів знижується в 10-20 разів в порівнянні з обробленням звичайної конструкційної сталі 45. Наприклад, при обробленні деталі з хромонікелевого сплаву ХН60Ю в 1,5-2 рази зростають сили різання в порівнянні з силовими параметрами конструкційних сталей, що є причиною більш високих температур в зоні різання, а також невеликих періодів стійкості різального інструменту

3.3. Аналіз результатів реологічного моделювання процесів різання титанових сплавів, дозволяє зробити висновок, про те, що в умовах високошвидкісної деформації матеріалу має місце адіабатичний зсув - утворення локальних зон підвищеної пластичної деформації, енергія якої перетворюється в теплову, що знижує межу текучості при підвищенні температури. Для титанових

сплавів характерна надзвичайно низька теплопровідність, значно нижча, навіть ніж у жароміцних сталей і сплавів. Як наслідок, при різанні титанових сплавів виникає температура, що більш ніж у 2 рази що перевищує рівень температур при обробленні сталі 45. При активному виділенні тепла в умовах стружкоутворення з більшою швидкістю, ніж його відведення в середовище охолодження за рахунок теплопровідності, тепло концентрується поблизу смуг або площин ковзання, що призводить до виникнення так званих адіабатичних смуг зсуву. При зсувній деформації перехід від однорідної деформації до адіабатичного зсуву визначається величиною і швидкістю деформації. Температура в області адіабатичного зсуву ($t = 1350 \dots 1390^\circ\text{C}$) залежить крім величини і інтенсивності деформації і від теплофізичних характеристик матеріалу. Утворення адіабатичних смуг зсуву може привести до руйнування по цих смугах і утворенню сегментної стружки. У області високих температур може протікати поліморфне перетворення або утворення зони інтенсивного зсуву. У екстремальних умовах, коли відбувається процес стружкоутворення, найбільш імовірно встановлення динамічної рівноваги між кристалічною і аморфною структурними фазами титанових сплавів.

3.4. Таким чином, аналіз результатів реологічного моделювання процесу лезового оброблення сплавів на основі титану, нікелю, молібдену та вольфраму показують, що змінно-елементний характер стружкоутворення, характерний для адіабатичного зсуву, зумовлює умови опору пластичній деформації, циклічності дії сил різання в площині зсуву та геометричної зміни кута зсуву. Кількість елементів зсуву при одному врізанні різального клина в метал визначає частоту коливань сили зсуву за час контакту, а зміна опору металу зсуву на початку і кінці шляху ковзання в умовах високої температури, великої швидкості деформації і гідростатичного стиску визначає величину амплітуди сили. В результаті, процес утворення стружки при обробленні зі швидкостями до 160 м/хв відбувається в умовах нестійкого різання, що веде до виділення великої кількості теплоти, виникнення макроскопічних залишкових напружень першого роду в металі поверхневого шару заготовки, інтенсивному зношуванні

інструменту і динамічної нестабільності в зоні різання. Причому залишкові напруження виникають синхронно з зростанням складової сили різання по осі Y.

4. Проаналізувавши вплив переднього кута різального клина на реологічні властивості матеріалів, можна зробити висновки, що підтверджують експериментальні дані та розвивають теоретичні положення процесу теорії різання:

4.1. Передній кут γ має суттєве значення на формування силових, деформаційних та вібраційних характеристик матеріалів, особливо в діапазоні $\gamma < 5^\circ$. При обробленні більшості конструкційних та низьколегованих сталей збільшення кута γ від 5° до 15° призводить до зменшення сил різання лише на 3...5%. Натомість, при зменшенні кута γ від 5° до 0° відбувається суттєве зростання сили різання – приблизно на 20...25%.

4.2. При обробленні жароміцних сплавів з великим вмістом нікелю, вольфраму, хрому, молібдену, та іншими матеріалами, схильними до утворення інтерметалідних сполук низької теплопровідності, зростання сили різання при зменшенні кута γ від 5° до 0° є набагато більшим і становить приблизно 45...50% в зоні усталеного різання. Такий різкий стрибок сили різання можна пояснити тим, що разом із зростанням навантаження стілко зростає і температура в зоні різання, причому при порівнянні температурних полів при обробленні сталі 20 і жароміцного сплаву ХН60Ю, можна зробити висновок, що температура в зоні різання жароміцного сплаву на 50% вище від температури при обробленні сталі 20.

4.3. Вплив зміни переднього кута на силові показники при обробленні титанових сплавів значного зростання сили різання не спостерігається. Наприклад, при зменшенні γ з 5° до 0° сила різання при обробленні сплаву ВТ6 зростає на 15...20%, а при зменшенні γ з 15° до 5° сила різання взагалі практично не змінюється. Проте із збільшенням γ зростає частота коливань зон адіабатичного зсуву, що значно погіршує умови стружкоутворення, сприяє значним вібраційним навантаженням на інструмент і активному зростанню залишкових деформацій на обробленій поверхні.

4.4. Проаналізувавши результати численних реологічних імітаційних моделей щодо коливання радіальної складової різання, як величини, що найбільше впливає на формоутворюючі вібрації різального інструменту (за теорією проф. Жаркова І.Г.), можна зробити важливі висновки. Найбільші коливання матимуть місце при умові, що силі тертя стружки об передню поверхню інструменту P_T будуть протидіяти співнаправлені сила тиску стружкового сегменту на передню поверхню інструмента P_f , та сила пружного відтиску інструменту P_R . Тобто, сила тиску стружки на передню поверхню не буде гасити коливання інструмента, викликані динамічною зміною кута зсуву, коливаннями температури в зоні стружкоутворення, дефектами матеріалу, залишковими деформаціями, отриманими від попередніх методів оброблення тощо, а навпаки, буде їх збурювати. Це можливо за умови негативного переднього кута ($\gamma < 0^\circ$) різального клина. У випадку ж позитивного кута – спостерігається зворотна картина: різальний інструмент попадає у своєрідний клин між стружковим елементом і обробленою поверхнею. Причому дії сил на цих поверхнях є протилежними за напрямком, що і спричинює гасіння коливань інструмента. Наприклад, при точінні деталі зі сталі 20 на режимах різання - подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв, при передньому куті інструмента $\gamma = -5^\circ$ коливання складової сили різання є в межах 280...430 Н, при передньому куті інструмента $\gamma = 0^\circ$ - лише 40...60 Н, при передньому куті інструмента $\gamma = 5^\circ$ коливання складають 25...30 Н, а при передньому куті інструмента $\gamma = 15^\circ$ - лише 5...10 Н.

5. Аналіз реологічних моделей різання найбільш репрезентативних машинобудівних матеріалів дозволяє передбачити залежність між глибиною різання t , подачею S і температурою. Із збільшенням подачі зростає тиск стружки на різець, а разом з ним і робота деформації. Але при цьому, як відомо, усадка стружки зменшується і, отже, робота деформації, що доводиться на одиницю об'єму стружки, також зменшується. До того ж тертя на задній поверхні інструменту зі збільшенням подачі мало змінюється. Тому кількість теплоти, що утворюється в стружці,

збільшуватиметься у меншій мірі порівняно зі збільшенням подачі. В той же час з потовщенням стружки відведення теплоти покращується, оскільки площа контакту стружки з різцем розширюється. В результаті температура різання підвищується зі збільшенням подачі, але у меншій мірі, чим при підвищенні швидкості.

Ще менше впливає на температуру значення глибини різання, оскільки навантаження на одиницю довжини різальної кромки не змінюється. Із збільшенням глибини різання при постійному куті в плані φ пропорційно збільшується довжина різального леза, але й еквівалентно посилюється тепловідвід від неї. Отже, на одиницю довжини різальної кромки збільшення теплоти буде дуже незначним. В результаті температура мало зміниться зі збільшенням глибини різання. Для підтвердження цих теоретичних міркувань в системі DEFORM 2D була розроблена та досліджена імітаційна модель, що дозволила проаналізувати вплив глибини різання на температуру в зоні стружкоутворення. Змодельовано процес точіння при глибинах: 0,1 мм, 0,4 мм, 0,7 мм, 1,0 мм, 1,3 мм. Підтверджено, що зі збільшенням глибини різання в усталеній частині процесу різання зростає температура в зоні стружкоутворення зростає, але тільки в діапазоні $S=0,1 \dots 0,4$ мм (на 20%). При більшому зростанні подачі різниця температур коливається в межах $50 \dots 70^\circ$, що становить 5-7% різниці. Таким чином, глибина різання, суттєво не впливаючи на температуру різання в заготовці, значно змінює температуру різального інструменту за рахунок зміни потужності теплових потоків. Зміна подачі супроводжується зміною температури різання, сил різання, інтенсивності зносу, а також довжини шляху різання пройденого різцем при обробці деталі. Тому вплив подачі на температуру інструменту виявляються також і в залежності від тривалості обробки. При короткочасній обробці зміна температури є наслідком зміни температури різання і величини теплових потоків, спрямованих в інструмент. При тривалій обробці на величину температури позначається також вплив зношування інструмента.

6. З метою аналізу впливу фізико-хімічних та механічних характеристик оброблюваного матеріалу деталей на термодинамічні показники процесу різання проведені імітаційні реологічні дослідження при обробленні сталей та сплавів, що представляють репрезентативний спектр машинобудівних матеріалів. Так, при різанні

більш крихких металів, наприклад сталі 45, коли робота пластичної деформації є меншою і питомі сили різання відносно незначні, температура різання помітно нижче (на 20%), ніж при обробленні сталі 20. Низька температурна провідність жароміцного хромонікелевого сплаву ХН60Ю спричинює концентрацію температури (до 1000°C) біля переднього різального леза і спричинює суттєві температурні деформації стружки та різального інструменту. Аналогічні висновки щодо температурних полів при обробленні титанового сплаву ВТ6. В даному випадку суттєві коливання температур (10...12%) пояснюється адіабатичним процесом стружкоутворення. При цьому тепло, що виділяється в результаті роботи пластичної деформації, локалізується у вузькій зоні; деформація зсуву стає локально концентрованою, а стружка - суглобистою, циклічною, елементною. При обробленні алюмінієвого сплаву АД33 температура різання є порівняно низькою (приблизно 360°C) не лише через незначне навантаження, але і внаслідок високої теплопровідності алюмінію.

РОЗДІЛ 4.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОГЕОМЕТРІЇ ТА ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ДЕТАЛЕЙ ЯК РЕЗУЛЬТАТ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ФОРМОУТВОРЕННЯ

Комплексний підхід до технологічного забезпечення оптимальної працездатності виробів машинобудування базується на оцінці показників якості деталей в залежності від технологічних чинників і результатів прогнозування експлуатаційних властивостей деталей в залежності від їх показників якості. Кількісні та якісні показники функціональної ефективності виконавчих поверхонь деталей, такі як зносостійкість, втомна міцність, корозійна стійкість, трибомеханічна якість спряжень тощо, в значній мірі визначаються показниками мікротопології спряжених поверхонь виробу, якості поверхневого шару (в. т.ч. залишковими напруженнями та деформаціями), макрогеометричними властивостями деталей, що, в першу чергу, є наслідком реалізації технологічного процесу виготовлення цих виробів. У інженерній практиці проектування технологічних процесів виготовлення деталей з заданими параметрами якості ґрунтується, як правило, на технологічних принципах послідовного підвищення точності і зниження шорсткості поверхонь деталей. Проте, для ефективної реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу та отримання високої функціональної якості продукції цього недостатньо. Виникає необхідність проблемно-спрямованої корекції структури та параметрів технології у відповідності до умов забезпечення ефективної експлуатації машинобудівних виробів. Це особливо важливо при виготовленні прецизійних деталей та деталей, що підлягають в процесі експлуатації підвищеним механічним, температурним, хімічним,

трибомеханічним навантаженням або їх поєднанням. Адже саме такі деталі найчастіше забезпечують експлуатаційну якість виробу в цілому. Для виробів, які не відповідають цим умовам функціонування, доцільно використовувати алгоритм, що реалізує традиційну концепцію об'єктно-орієнтованого технологічного проектування.

Стан поверхневого шару характеризується його твердістю, мікроструктурою, величиною та знаком залишкових напружень і глибиною їх залягання. Фактори, що впливають на шорсткість обробленої поверхні, також впливають і на її пластичну деформацію. Таким чином, пластична деформація, величина наклепу і висота складових мікронерівності профілю обробленої поверхні мають фізичний зв'язок, що необхідно встановити методами імітаційного реологічного моделювання. Це дасть змогу здійснювати оптимальне проектування структури і параметрів технологічного процесу з врахуванням взаємопов'язаного комплексу найбільш значущих чинників процесу формоутворення деталі.

4.1. Дослідження моделі формування мікронерівності поверхні з урахуванням пластичної течії матеріалу

4.1.1 Концептуальна модель формування основних параметрів мікротопології поверхонь

Ідея функціонально-орієнтованого проектування полягає у визначенні та аналізі висотних та крокових параметрів мікронерівностей оброблюваних поверхонь деталі необхідному для вирішення задачі вибору такої структури та параметрів технологічних операцій та переходів, що забезпечать оптимальний комплекс функціональних властивостей цієї деталі в умовах її потенційної експлуатації. Мікрорельєф обробленої поверхні утворюється в результаті векторного додавання трьох складових (Рис.4.1): висоти мікронерівностей, одержуваної в процесі копіювання різальної частини інструмента з урахуванням

кінематичних характеристик її руху (Δ_1), висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки (Δ_3) [293]. Слід зазначити, що незначною за величиною складовою шорсткості, що виникає внаслідок шорсткості робочих поверхонь інструмента, можна знехтувати, оскільки ця величина не перевищує 2...5% від загального значення параметру Rz .

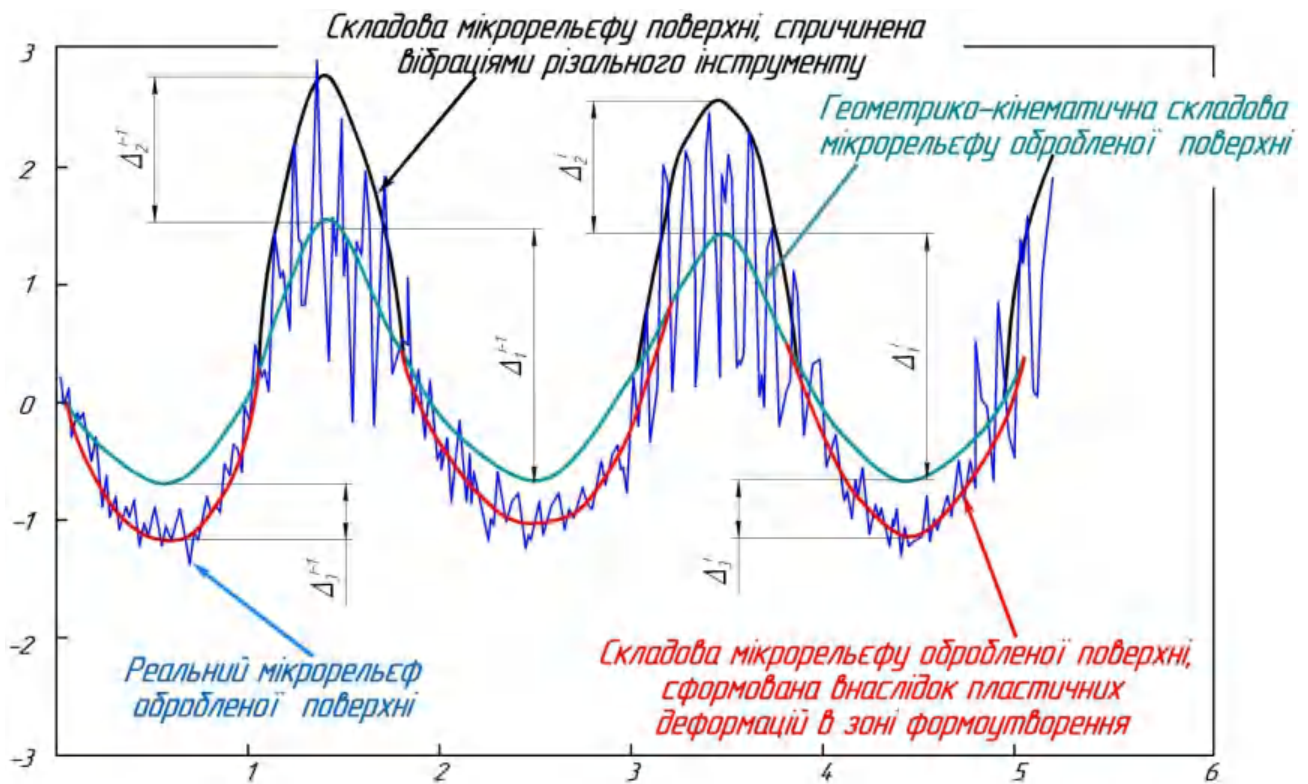


Рис.4.1. Схема для розрахунку мікропрофіля поверхні.

У різних умовах формоутворення поверхонь деталі величина подачі та геометрія різального інструмента (формування складової Δ_1), пластичні і пружні деформації оброблюваного матеріалу (формування складової Δ_3) і вібраційні процеси системи ВПД (формування складової Δ_2) спотворюють геометрично правильну форму нерівностей, порушуючи їх закономірний розподіл на поверхні і в значній мірі збільшуючи їх висоту. У ряді випадків пластичні

деформації і вібрації викликають появу хвилястості, що досягає значних розмірів, і збільшення поперечної шорсткості (Рис.4.2). Як правило, домінуючий вплив на формування шорсткості поверхні має одна з трьох вище зазначених причин, яка і визначає характер і величину шорсткості [293, 294]. Проте в окремих випадках (наприклад, високошвидкісне різання або фінішна обробка) шорсткість виникає в результаті одночасного і майже рівнозначного впливу всіх вищезазначених причин. Процес виникнення нерівностей внаслідок геометричних причин прийнято трактувати як копіювання на оброблюваній поверхні траєкторії руху і форми різальних лез. З геометричної точки зору, величина, форма і взаємне розташування нерівностей (напрям рисок – дискретного сліду лезового інструменту) визначаються формою і станом різальних лез і тими елементами режимів різання, які впливають на зміну траєкторії руху інструменту щодо оброблюваної поверхні.

Геометрико-кінематичні причини утворення шорсткості є очевидними [88, 89, 260, 295] (Рис.4.2): за один оберт заготовки (інструменту) інструмент (заготовка) переміщається на величину подачі S , залишаючи при цьому деяку частину металу, не зруйновану різальним клином, що й утворює залишковий гребінець висотою Δ_l . Цілком очевидно, що величина і форма нерівностей поверхні, що складаються із залишкових гребінців, визначаються подачею і формою цього різального інструменту. Висота кінематико-геометричної складової шорсткості без врахування радіусу при вершині різального інструменту r , визначається у відповідності до подачі S і головного φ та допоміжного φ_1 кута в плані різального клина.

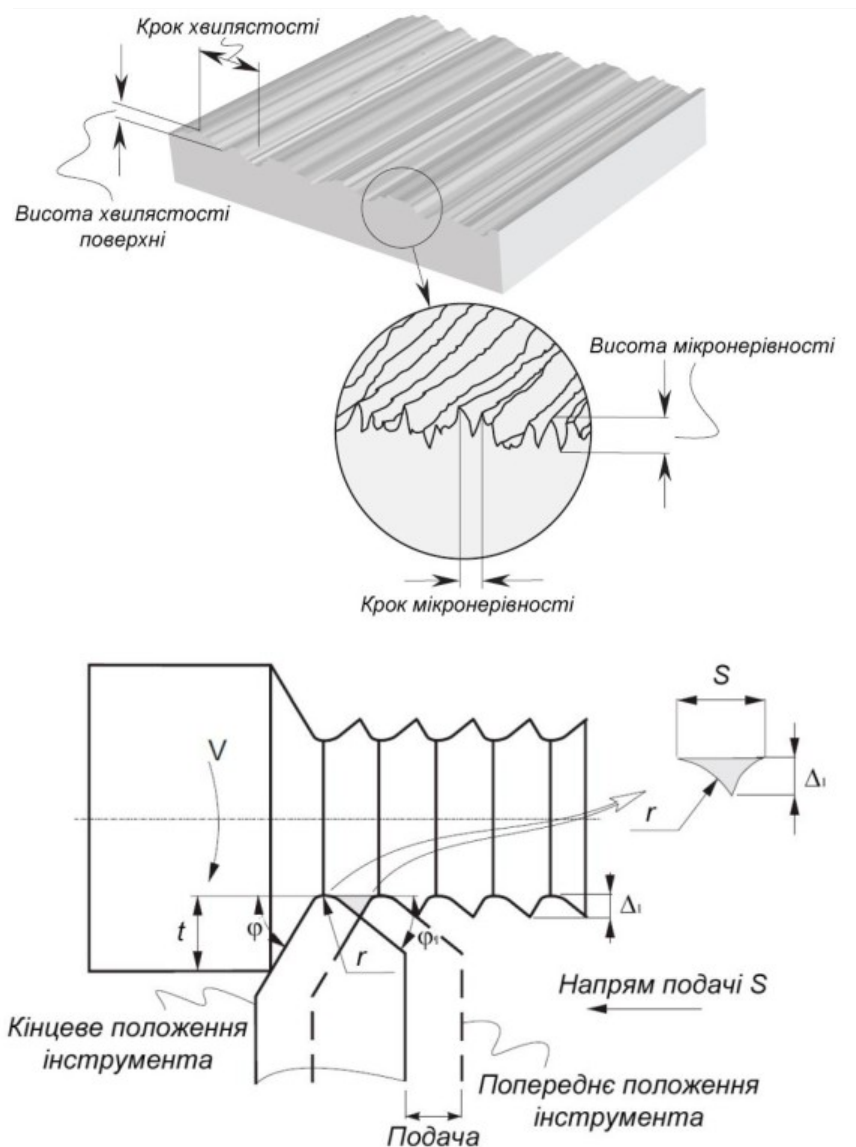


Рис.4.2. Схема формування залишкового мікрорельєфу на обробленій поверхні (кінематико-геометричної складової шорсткості Δ_1).

t - глибина різання, мм; r – радіус при вершині інструмента, мм; S – подача за оберт заготовки (інструменту), мм/об; φ - головний кут в плані; φ_1 – допоміжний кут в плані.

З врахуванням значення r , розрахунок дещо ускладнюється, оскільки необхідно врахувати співвідношення головного φ та допоміжного φ_1 кута в плані. Користуючись рекомендаціями [293, 327], величина Δ_1 з геометричної побудови (рис.4.2) визначається за такими залежностями:

– При $\phi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_1 = \frac{S \cdot \sin \phi \cdot \sin \phi_1}{\sin(\phi + \phi_1)} \quad (4.1)$$

– При $\phi > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 \geq \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ внаслідок перетворення у рівняння Чебишева [293, 294]:

$$\Delta_1 = \frac{S^2}{8r} \quad (4.2)$$

– При $\phi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_1 = r \cdot (1 - \cos \phi_1) + \sin \phi_1 \left[S \cdot \cos \phi_1 - \sqrt{S \cdot \sin \phi_1 (2r - S \sin \phi_1)} \right] \quad (4.3)$$

– При $\phi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\phi_1 > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_1 = r \cdot (1 - \cos \phi) + \sin \phi \left[S \cdot \cos \phi - \sqrt{S \cdot \sin \phi (2r - S \sin \phi)} \right] \quad (4.4)$$

Величина радіусу при вершині інструменту є дуже важливою при чорновому обробленні з точки зору міцності різального леза, а при чистовому обробленні - з точки зору отримання необхідної шорсткості поверхні. В обох випадках радіус при вершині тісно пов'язаний з величиною подачі, тому вибирати його треба з огляду на подачу та швидкість різання.

Дані формули можна використовувати, крім точіння, при розточуванні, свердлінні, зенкеруванні, струганні та фрезеруванні торцевими фрезами. При фрезеруванні дисковими фрезами, величина кінематико-геометричної складової визначається положенням двох кіл, розташованих один від одного на відстані, що дорівнює подачі S_z на зуб фрези [94]:

$$\Delta_1 = 0,5 \left(D - \sqrt{D^2 - S_z^2} \right) \quad (4.5)$$

Звідси $0,25S_z^2 = \Delta_1 \cdot D - \Delta_1^2$. величиною Δ_1^2 можна знехтувати, як величиною на 2 порядки меншою від іншої складової даної формули. Тоді формулу (4.5) можна записати як:

$$\Delta_1 \approx \frac{S_z^2}{D} \quad (4.6)$$

де D - діаметр фрези.

4.1.2. Математичне моделювання вібраційної складової мікронерівності поверхні в процесі її формоутворення

У процесі різання виникають вимушені коливання системи верстат-заготовка-інструмент, що викликаються дією зовнішніх сил, і автоколивання системи, поява яких пов'язана з періодичним зміцненням (наклепом) зрізаного шару металу і зміною умов тертя або різання. Вимушені коливання системи ВПД обумовлюються геометричними похибками окремих механізмів верстата. Автоколивання виникають внаслідок розбалансованості внутрішньосистемних чинників – зміни величини сил різання і тертя на робочих поверхнях інструменту, а також площі поперечного перерізу зрізаного шару металу; утворення і зриви наростів; пружними деформаціями заготовки і інструменту тощо. Очевидно, що вібрація леза різального інструменту щодо оброблюваної поверхні є додатковим джерелом збільшення шорсткості обробленої поверхні. Причому, висота шорсткості поверхні буде тим значніше, чим більше подвоєна амплітуда коливання леза інструменту щодо оброблюваної поверхні.

Фізичний механізм виникнення та розвитку автоколивань діє у такій послідовності [135]. Будь-яке випадкове збурення (динамічні процеси при врізанні та зміні руху інструменту, нерівномірність припуску, неоднорідність оброблюваного матеріалу, слід від попереднього переходу, уривчастість оброблення, радіальне биття заготовки або інструменту тощо), призводить до виникнення власних затухаючих коливань технологічної системи. Ці коливання

завжди супроводжуються зміною кута зсуву ϕ і сили різання P (особливо важливою є вплив радіальної сили різання P_r на формування мікронерівностей профілю), оскільки зона різання є замикаючою ланкою пружної технологічної системи. І якщо зміна сили різання відстає в часі (зміщується по фазі) відносно зміни товщини зрізу або якщо зі збільшенням швидкості відбувається зменшення радіальної складової сили різання (падаюча характеристика сили різання від швидкості), то власні затухаючі коливання можуть перейти в незгасаючі автоколивання, де енергію, необхідну для підтримки коливань, створює змінна сила різання. Ці два чинники - відставання зміни сили різання від зміни товщини зрізу (чи фазова характеристика сили різання) і характеристика сили різання (чи тертя), що зменшується при зростанні швидкості різання - і є основними первинними джерелами збудження автоколивань інструмента.

Очевидно, що зміна товщини зрізу a є величиною, еквівалентною куту зсуву ϕ (Рис.4.3). Таким чином, механізм виникнення стохастичних автоколивань, можна проілюструвати на прикладі аналізу реологічної імітаційної картини різання. Очевидним є зсув по фазі максимально-мінімальних значень кута зсуву і радіальної складової сили різання (Рис.4.5).

При дослідженні автоколивань використовується модель технологічної системи, подана на Рис.4.4. Динаміку цих величин та їх амплітудні значення проілюстровано на рис.4.5 - 4.6. [276]

У цій моделі заготовку розглядають як абсолютно тверде тіло, що має рівномірний обертальний рух. Увесь коливальний процес пов'язаний тільки з переміщенням різця. Масу системи, що коливається, розглядають зосередженою на вершині різця. Пружні зв'язки схематично представлені у вигляді пружин, на яких підвішена маса (Рис.4.4). Пружні зв'язки спрямовані по головних осях і жорсткості системи. В процесі різання інструмент, виведений якою-небудь причиною із стану рівноваги, починає коливатися в трьох напрямках.

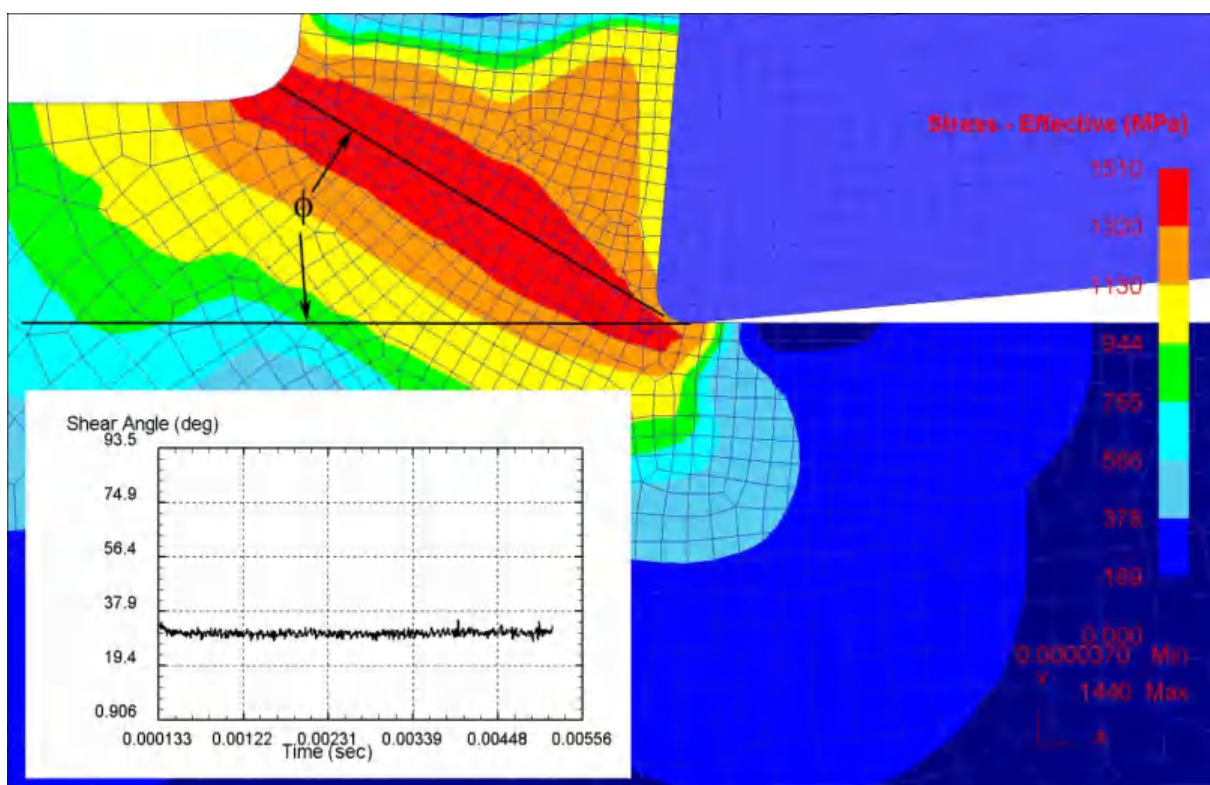


Рис.4.3. Моделювання динаміки кута зсуву при обробленні деталі зі сталі 4530ХГСН2А(ГОСТ 4543 – 71)

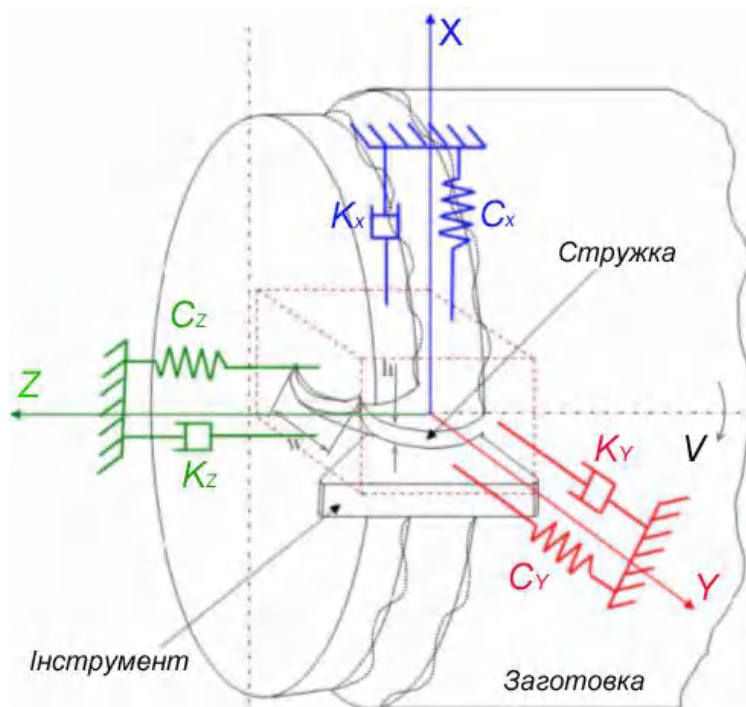


Рис.4.4. 3-D схема механічної моделі технологічної системи різання з пружними зв'язками

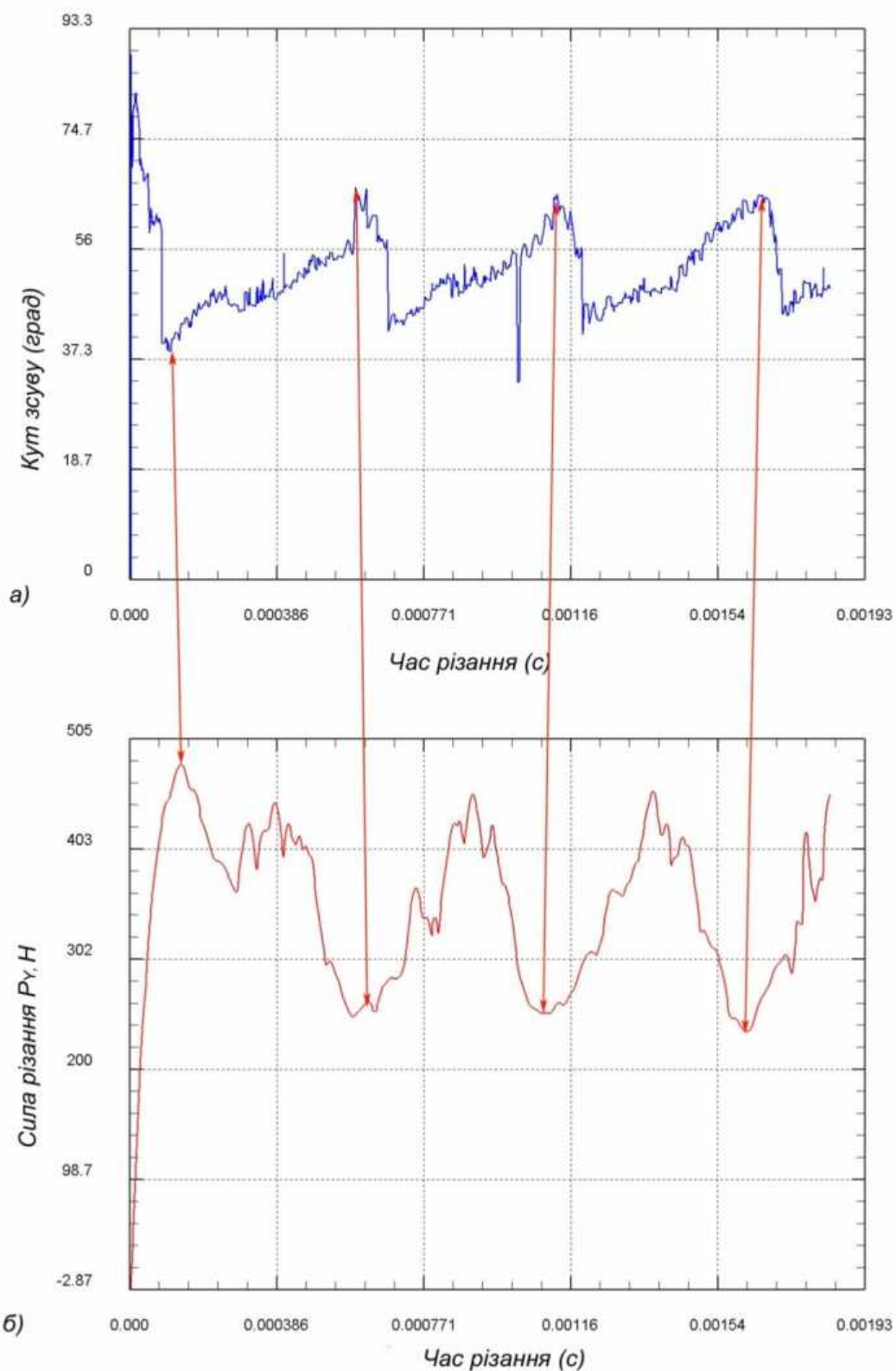
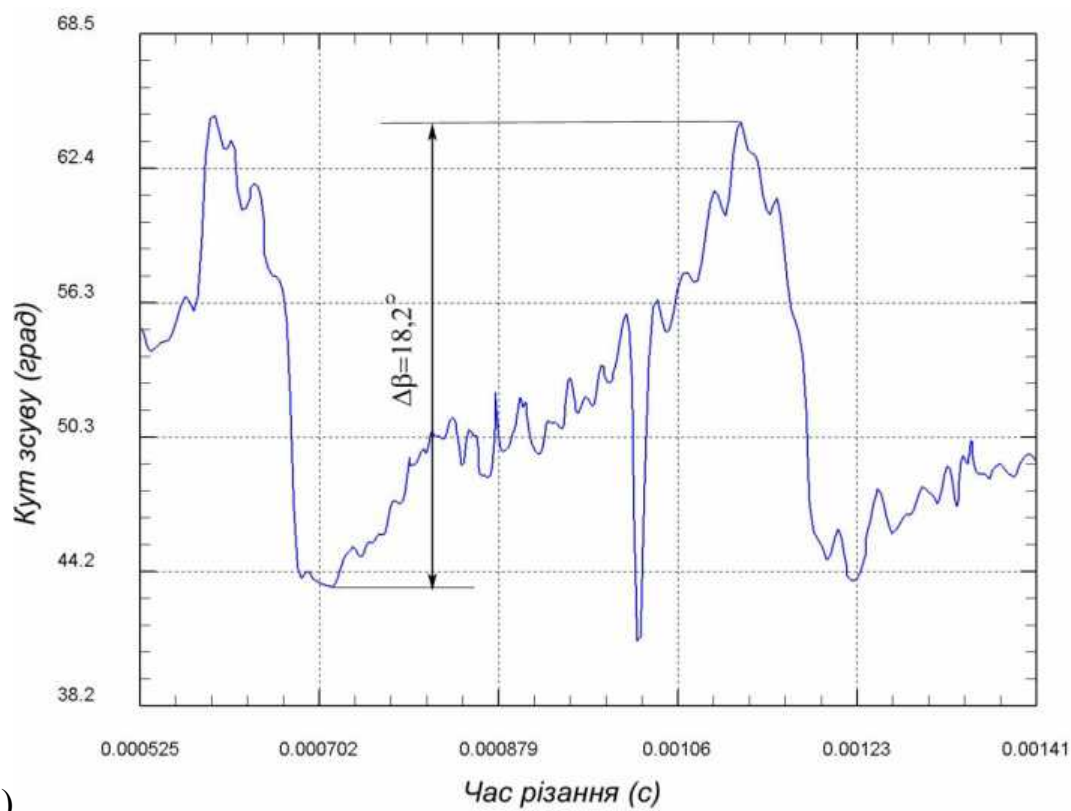
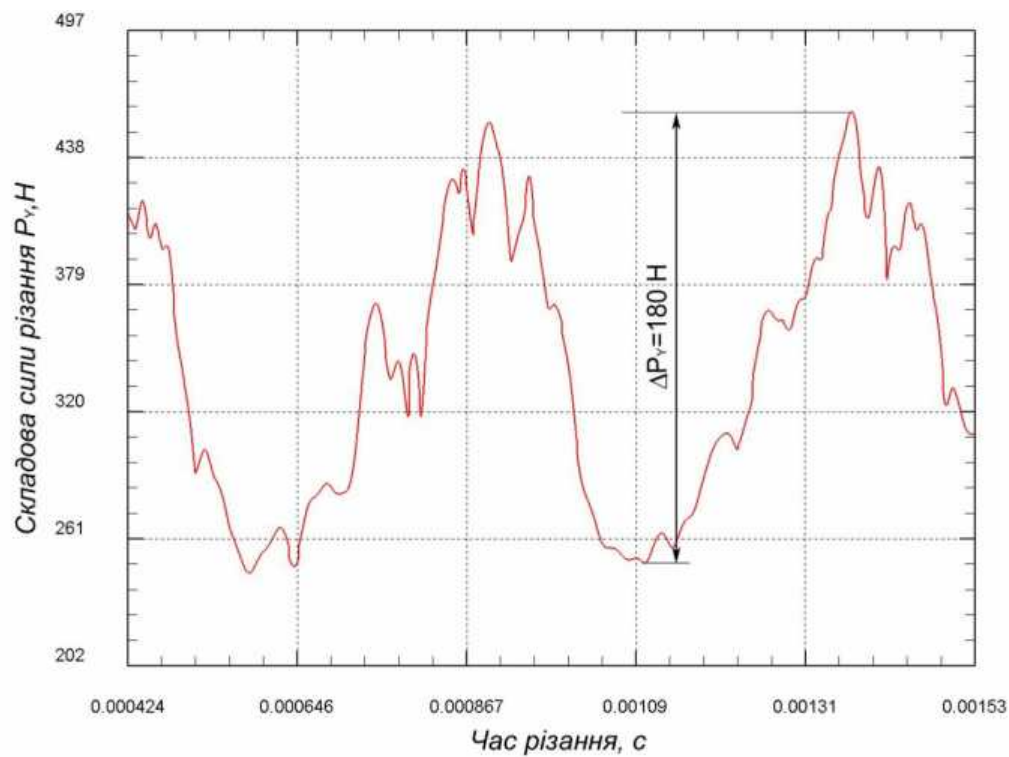


Рис.4.5. Механізм збурення автоколивань (синхронність зсуву по фазі максимально-мінімальних значень кута зсуву (а) і радіальної складової сили різання (б)).



а)



б)

Рис.4.6. Динаміка миттєвих значень кута зсуву (а) і радіальної складової сили різання (б) та їх амплітудні значення

Динамічна нестабільність технологічної системи при роботі на інтенсивних режимах різання обумовлена, головним чином, вторинним збудженням (регенерацією) автоколивань під впливом вібраційного сліду на поверхні різання. Очевидно, що для досягнення максимальної ефективності управління вторинними автоколиваннями треба впливати безпосередньо на сам механізм їх регенерації, що вимагає ясного розуміння його природи і закономірностей. В ході регенерації автоколивань їх фаза відносно коливань сліду встановлюється незалежно від початкових умов, що свідчить про самоорганізацію системи ВПД [255, 276]. Руйнування цієї самоорганізації примусовою зміною фази автоколивань, наприклад, за допомогою періодичної плавної зміни (модуляції) швидкості різання, відкриває нову можливість управління динамічною стабільністю технологічної системи ВПД.

Якщо розглядати процес фрезерування (Рис.4.7), то очевидно, що кожен зуб фрези, здійснюючи коливання, залишає за собою хвилясту поверхню заготовки, і в результаті кожен подальший зуб зрізує шар заготовки змінної товщини, що у свою чергу призводить до осциляцій сили різання і появи регенеративних вібрацій [255].

Для пружних технологічних систем, що здійснюють інтенсивні автоколивання, при їх моделюванні можна користуватися розрахунковою схемою, де інструмент (чи заготовка) схематизуються як точкова маса з двома ступенями вільності, що здійснює коливання в двох взаємно перпендикулярних напрямках. У кожному з напрямів маса закріплена за допомогою пружних і демпфувальних елементів. На масу діє також збурююча сила, що є результатом взаємодії різальних кромek інструменту з матеріалом заготовки - сила різання, яка може бути представлена через її складові P_z , P_y . Розрахункова схема для нелінійної динамічної моделі процесу токарного оброблення, що враховує регенеративні автоколивання різального інструменту, наведена на Рис.4.8 [276].

У загальному вигляді класичне рівняння руху інструменту може бути інтерпретовано системою рівнянь:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + K_Z\dot{z} + C_Zz = P_Z \\ M\ddot{y} + K_Y\dot{y} + C_Yy = P_Y \end{cases} \quad (4.7)$$

де M - приведена маса системи;

K_Z, K_Y – узагальнені коефіцієнти демпфування по осях Z і Y , відповідно;

C_Z, C_Y – - приведена жорсткість системи по осях Z і Y , відповідно;

P_Z, P_Y - значення сил різання по осях Z і Y , відповідно.

Вирішуючи цю систему рівнянь, можна отримати значення параметрів, що визначають рух різця в процесі вібрацій. Цей рух є сумою двох коливальних рухів, зміщених на кут ψ по фазі у напрямі осей Z і Y :

$$\begin{cases} z = A_Z \cdot \sin \omega t \\ y = A_Y \cdot \sin(\omega t - \psi) \end{cases} \quad (4.8)$$

де A_Z, A_Y - амплітуди переміщень вершини різця по відповідних осях координат; ω - частота коливань; ψ - зсув фаз коливань по різних осях.

Згідно наведених в розділі 3 формул 3.1-3.2, складові сили різання P_Z і P_Y можна записати як функції, що залежать від умов різання, кутів інструменту і умов тертя між інструментом і заготовкою, а саме:

$$\begin{cases} P_Z = \frac{a \cdot b \cdot \tau \cdot \cos \omega}{\sin \phi \cos(\phi + \omega)} \\ P_Y = \frac{a \cdot b \cdot \tau \cdot \sin \omega}{\sin \phi \cos(\phi + \omega)} \end{cases} \quad (4.9)$$

де: τ - дотичне напруження в площині зсуву (рис.3.1);

ϕ - кут зсуву;

a, b - товщина і ширина різання, відповідно;

ω - кут дії між результуючою силою і напрямом подачі.

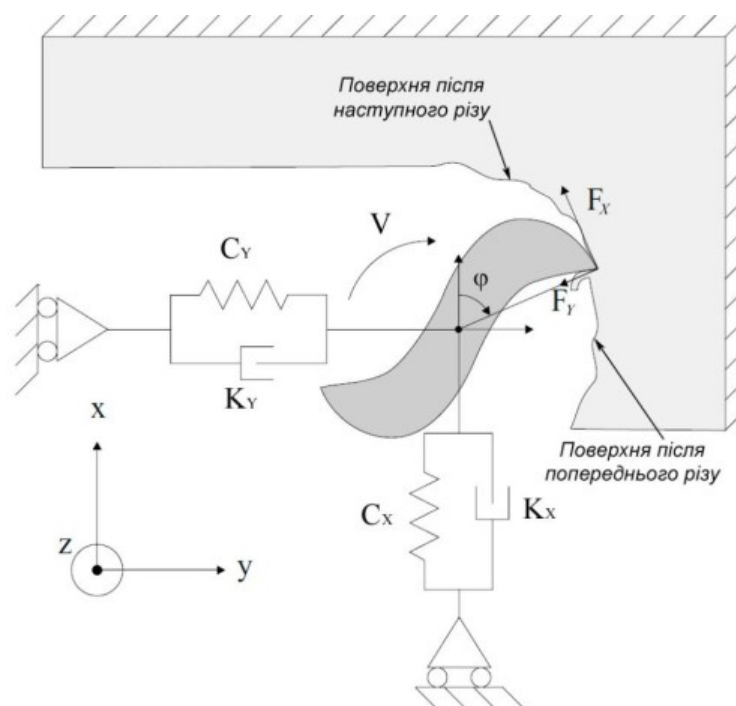


Рис.4.7. Схема для розрахунку регенеративних автоколивань інструменту при фрезеруванні

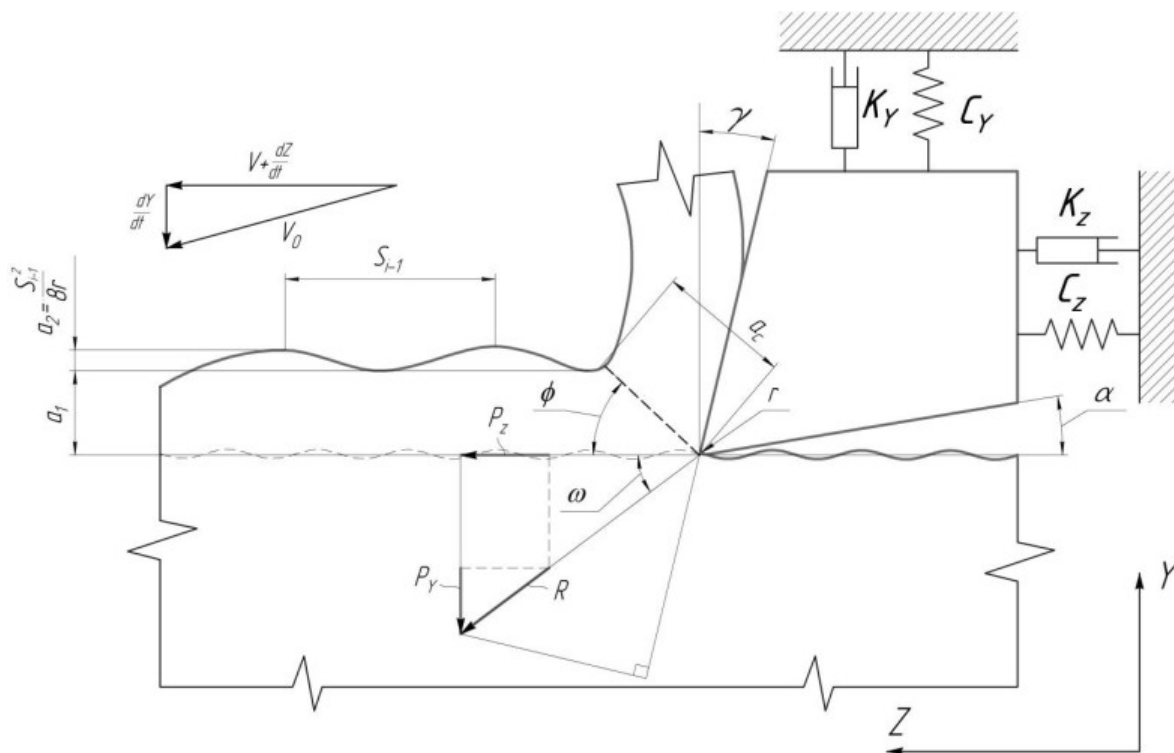


Рис.4.8. Розрахункова схема динамічної моделі процесу оброблення, що враховує регенеративні автоколивання різального інструменту
З врахуванням регенеративних коливань, дійсна товщина зрізу a стає

змінною величиною, що залежить від постійної заданої величини a_1 , що визначається глибиною різання, і динамічної складової a_2 , що формується за рахунок мікро- та макронерівностей, які утворені в результаті деформацій поверхневого шару деталі після попереднього технологічного переходу або внаслідок похибок у виготовленні заготовки (Рис.4.8):

$$a = a_1 + a_2(x). \quad (4.10)$$

Оскільки найбільший вплив вібраційних коливань інструменту на формування мікронерівності профілю спостерігається під час виконання чистових та фінішних операцій, то для таких умов змінну складову глибини різання можна визначити за формулою [276]:

$$a_2(x) = \frac{\Delta_1}{2} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (4.11)$$

Враховуючи, що $\Delta_1 = \frac{S_{i-1}^2}{8r}$ (для $\varphi > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\varphi_1 \geq \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$):

$$a_2(x) = \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (4.12)$$

де S_{i-1} – подача на попередньому технологічному переході;

r – радіус при вершині інструмента.

Напруження зсуву τ_{xy} (Рис.4.10) незначно залежить від швидкості різання [40], що й доведено результатами реологічного моделювання (див. розділ 3) і може бути представлено як постійна величина. Кут зсуву ϕ є динамічною величиною, що змінюється в часі в результаті змінних величин: сил різання, профілю оброблюваної поверхні, геометричних параметрів та форми стружки, що детально описано в розділі 3 (Рис.4.11).

Середній коефіцієнт тертя μ між інструментом і заготовкою визначається відношенням складових сил різання P_Z і P_Y , що діють в зоні формоутворення (Рис.4.8) і отриманий таким чином:

$$\mu = \frac{P_z + P_y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{P_z - P_y \cdot \operatorname{tg} \gamma} \quad (4.13)$$

Крім того, відомо [221], що $a \cdot b = S_i \cdot t$.

Уточнена нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому переході. У моделі сили різання залежать від геометричних параметрів інструменту і механічних характеристик ортогонального різання [276]:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\cos \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} \end{cases} \quad (4.14)$$

де t - глибина різання.

Для великих швидкостей різання з врахуванням формули Мерчанта $\omega = \pi/2 - 2\phi$ [221]. Тоді з врахуванням перетворень:

$$\begin{aligned} \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} &= \frac{\sin \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right) \cdot \sin \phi} = \frac{\cos(2\phi)}{\sin(\phi) \cdot \sin \phi} = \\ &= \frac{\cos^2 \phi - \sin^2 \phi}{\sin^2 \phi} = \frac{\cos^2 \phi}{\sin^2 \phi} - 1 = \operatorname{ctg}^2 \phi - 1 \\ \frac{\cos \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} &= \frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right)}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - 2\phi \right) \cdot \sin \phi} = \frac{\sin(2\phi)}{\sin(\phi) \cdot \sin \phi} = \\ &= \frac{2 \sin \phi \cdot \cos \phi}{\sin \phi \cdot \sin \phi} = \frac{2 \cos \phi}{\sin \phi} = 2 \operatorname{ctg} \phi \end{aligned} ,$$

формула (4.14) набуде вигляду:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot (\operatorname{ctg}^2 \phi - 1) \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot 2\operatorname{ctg} \phi \end{cases} \quad (4.15)$$

Для середніх швидкостей різання ($V < 100$ м/хв) використовується вираз для розрахунку кута дії за формулою Окслі: $\omega = (\phi - 0,28\pi)/0,8$ [221]. Тоді формула (4.14) матиме вигляд:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin(1,25\phi - 0,35\pi)}{\sin \phi \cdot \cos(2,25\phi - 0,35\pi)} \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left(t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\cos(1,25\phi - 0,35\pi)}{\sin \phi \cdot \cos(2,25\phi - 0,35\pi)} \end{cases} \quad (4.16)$$

Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB, розраховуються амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи, а відтак визначається величина вібраційної складової мікронерівності Δ_2 .

Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB, знаходимо амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи (Рис.4.9).

Лінійні гармонійні коливання інструменту в радіальному напрямі у поєднанні з головним обертальним рухом заготовки і поступальною ходою подачі викликають утворення нерівностей в подовжньому (співпадаючому з напрямом головного руху) і радіальному (перпендикулярному йому) напрямі. Високочастотні коливання інструменту мають істотний вплив на шорсткість поверхні.

Максимальна висота нерівностей профілю(мкм) буде дорівнювати [185, 276]:

$$R_{\max} = 1000 \cdot 2A_{\max} \quad (4.17)$$

де A_{\max} - максимальна амплітуда коливань інструменту, що визначається при рішенні диференціального рівняння руху інструменту (4.15) або (4.16).

Мікрорельєф поверхні в радіальному напрямі моделюється накладенням на масив переміщень інструменту профілю його вершини в плані, який описується дугою радіусу r . В цьому випадку [195, 196]:

$$R_{\max} = \frac{2A - H_{\epsilon}}{1000} \quad (4.18)$$

де $H_{\epsilon} = R - (R - r) \cos \frac{\psi}{2} - \sqrt{r^2 - \left((R - r) \sin \frac{\psi}{2} \right)^2}$ - слід вершини інструменту, мм;

$$\psi = \arccos \left(1 - \frac{S^2}{2(R - r)^2} \right) - \text{центральний кут, рад};$$

r - радіус при вершині інструменту, мм.

Інші показники шорсткості, зокрема середню висоту нерівностей профілю Ra і висоту нерівностей по десяти точках Rz , можна визначити, скориставшись рівняннями перерахунку : $Ra = 0,17R_{\max}$; $Rz = 0,833R_{\max}$

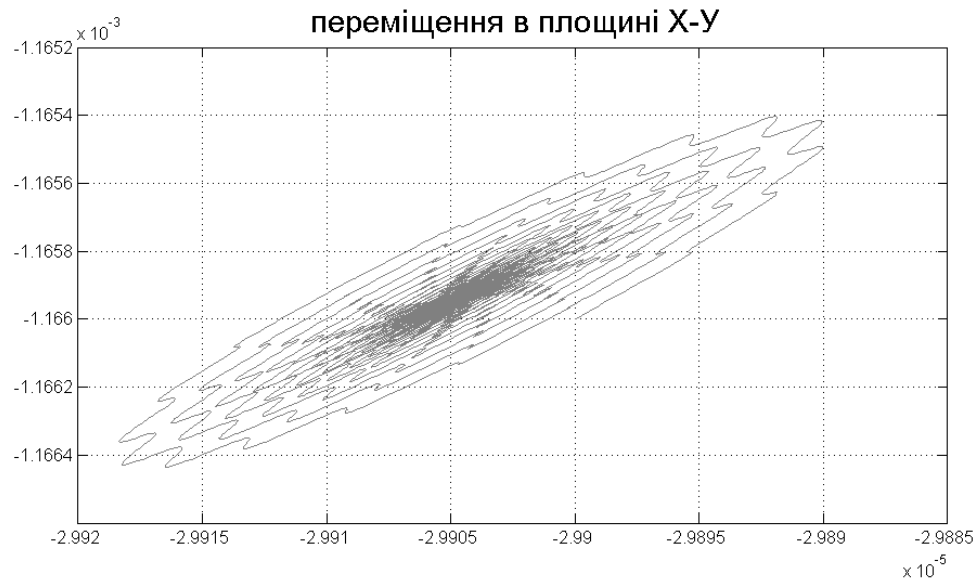


Рис.4.9. Результати моделювання автоколивань різального інструменту при токарному обробленні деталі ($D=50$ мм; $L = 250$ мм) зі сталі 45 (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість $V=120$ мм/хв)

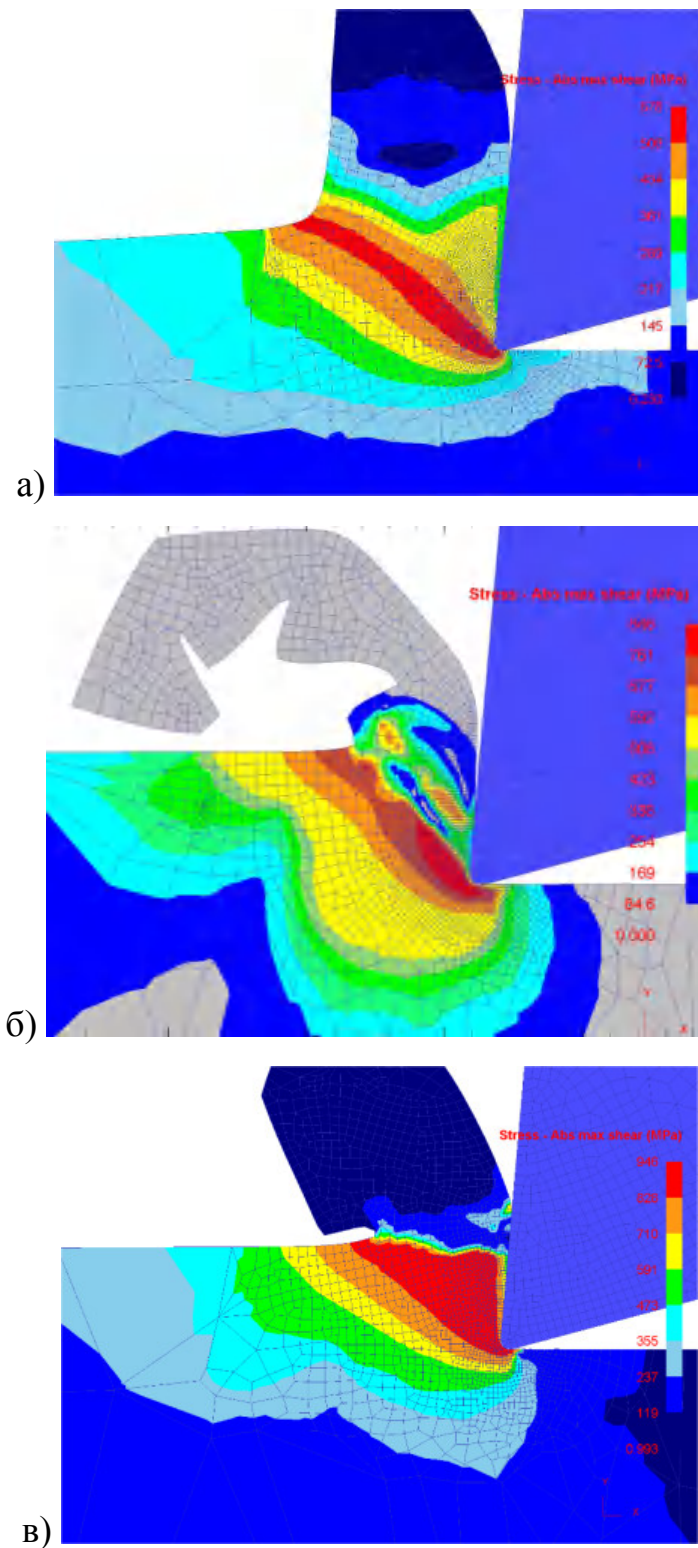


Рис.4.10. Реологічне моделювання абсолютних значень дотичних напружень зсуву τ_{xy} при обробленні сталі 45 (а), сплаву ВТ6 (б) та сплаву ХН60Ю (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв)

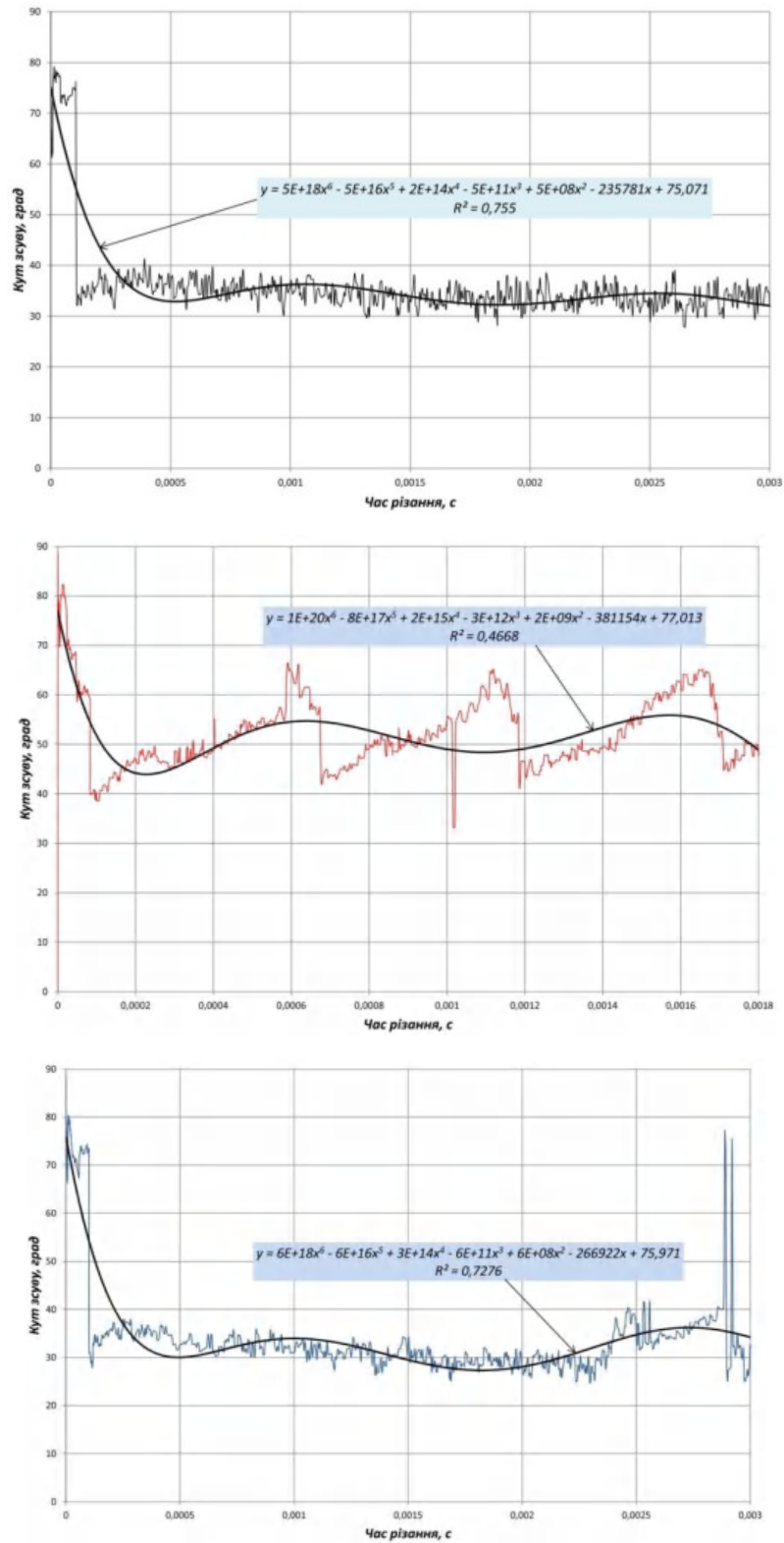


Рис.4.11. Динаміка зміни кута зсуву ϕ при обробленні сталі 45 (а), титанового сплаву VT6 (б) та жароміцного хромонікелевого сплаву XH60Y (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв)

4.1.3. Визначення деформаційної складової параметру мікронерівності із застосування методів реологічного імітаційного моделювання

Шорсткість оброблених поверхонь визначається, як механічними процесами взаємодії двох поверхонь - оброблюваної і інструментальної, так і трибоконттактними процесами і деформаційними перетвореннями зрізаних шарів в стружку. Першу складову можна представити як розрахункову висоту, визначувану геометричною побудовою (Рис.4.1), а її приріст обумовлений процесом різання з врахуванням вібраційних явищ, в тому числі регенеративних. Вона може бути розрахована до виконання операції. Друга — формується в процесі виконання операцій, і є інтеграційно-залежною від функціонування системи різання, що визначається процесами взаємодії трибоконттактів, що закінчуються утворенням вторинної перехідної пластично деформованої зони [70, 270, 277, 285]. Квазістабільні поверхні цієї зони частково або повністю змінюють передню і задні поверхні інструменту і, як наслідок, видозмінюють мікрогеометрію формотвірних лез. Ступінь впливу трибоконттактів на шорсткість поверхні при обробленні металів різанням залежить від вибраних режимів оброблення та геометрії різального клина. При чистових і фінішних технологічних переходах цей чинник має переважаюче значення.

Якщо при розрахунковому визначенні висоти залишкового гребінця обчислення геометричної складової представляє собою вирішене завдання (розділ 4.1.1), то аналітичне знаходження деформаційної складової є завданням особливої складності, оскільки ця задача пов'язана з об'ємною пластичною деформацією. Складність її аналітичної формалізації ускладнена використанням апарату теорії пластичності та нелінійної термодинаміки, що викликає необхідність ряду припущень, які суттєво знижують достовірність отримуваних результатів [293, 294]. Розвиток методів імітаційної інтерпретації динамічних

нелінійних процесів різання на основі дослідження результатів реологічного моделювання процесу різання дає можливість аналітичного розрахунку цієї складової мікротопології обробленої поверхні. Це і визначило можливість і обґрунтованість наведених нижче досліджень.

Рельєф обробленої поверхні твердого тіла в результаті пластичного деформування витримує флуктуації на нанометричному рівні, і ці флуктуації рельєфу є, по суті, проявом флуктуацій теплової енергії, що детально описано в розділі 3.3. Але слід визнати, що ці флуктуації теплової енергії в даному випадку є такими, що не руйнують, а навпроти призводять до формування зон пластичного деформування в структурі рельєфу поверхні. На формування мікрорельєфу і стану поверхневого шару накладається результат кінематичної і силової післядії перетворення зрізаного припуску в стружку, який призводить до утворення вторинної перехідної пластично-деформованої зони (так званої вторинної зони пластичного контакту). Для виявлення закономірностей формування залишкового гребінця необхідно встановити величину пластичного переміщення металу, що деформується в процесі різання, вздовж задньої поверхні різального леза.

У цьому випадку слід розглянути явище пластичного витиснення, як частковий випадок вирішення задачі Прандтля [150, 160]. Це вид деформування поверхонь, що настає, коли контактні напруження досягають межі текучості і матеріал обтікає проникне контртіло в контактній зоні пари тертя «інструмент - оброблювана заготовка», залежно від деформованого стану. Фізично це явище при різанні може бути викликане подовжньою і поперечною пластичною деформацією відносно геометрії (співвідношення головного φ і допоміжного φ_1 кута в плані, радіусу r при вершині інструменту) та кінематики різального клину інструменту.

Вирішуючи задачу формування деформаційної складової різання за методикою проф. А.Г.Суслова [293], отримаємо:

– при $\varphi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\varphi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_3 = \frac{0,5 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right)}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}} \quad (4.19)$$

– при $\varphi > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\varphi_1 \geq \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_3 = \frac{\left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right) \cdot \left(2S_i + \frac{r}{2} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right)\right)}{64} \quad (4.20)$$

– при $\varphi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\varphi_1 < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_3 = \frac{0,5 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right)}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1} + \frac{2r}{S_i}} \quad (4.21)$$

– при $\varphi < \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$ і $\varphi_1 > \arcsin\left(\frac{S}{2r}\right)$:

$$\Delta_3 = \frac{0,5 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right)}{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{2r}{S_i}}, \quad (4.22)$$

де τ_{xy} - динамічне напруження зсуву, МПа;

$\bar{\sigma}$ - ефективне середнє напруження, МПа;

r – радіус округлення вершини різального леза, мм.

Використовуючи результати реологічного імітаційного моделювання процесу різання згідно вищенаведеної методики, можна розрахувати значення деформаційної складової мікронерівності профілю Δ_3 у будь-який момент процесу стружкоутворення.

Вихідними даними для розрахунку величини деформаційної складової мікронерівності, крім заданих геометричних параметрів інструменту (r , φ , φ_1) є динамічні напруження зсуву τ_{xy} та нормальні напруження $\bar{\sigma}$ (приклад формування таких даних наведений на Рис.4.12 для токарного оброблення заготовки зі сталі 45; $V=120$ м/хв; $S=0,2$ мм, $t=1$ мм). На Рис.4.13 наведені результати моделювання деформаційної складової мікронерівностей Δ_3 профілю при обробленні сталі 45 в залежності від радіусу r при вершині інструменту та від подачі інструменту S . В даному випадку приймались умови: $\varphi=\varphi_1=45^\circ$, а отже Δ_3 розраховувалась за формулою (4.19). Аналіз вищенаведених графічних залежностей дозволяє зробити висновки, про те, що величина деформаційної складової мікронерівностей зростає як із збільшенням радіусу r при вершині інструменту, так і від подачі інструменту S . Причому, зростання саме подачі S більш суттєво позначається на результатах формування деформаційної складової Δ_3 . Так, зростання радіусу при вершині в 10 разів (з 0,1 до 1,0 мм) викликало збільшення величини Δ_3 лише в 2,2 рази – з 5 до 11 мкм. В той же час збільшення подачі з 0,05 до 0,8 мм сприяло зростанню Δ_3 в 7 разів (з 2 до 14 мкм) [70, 285].

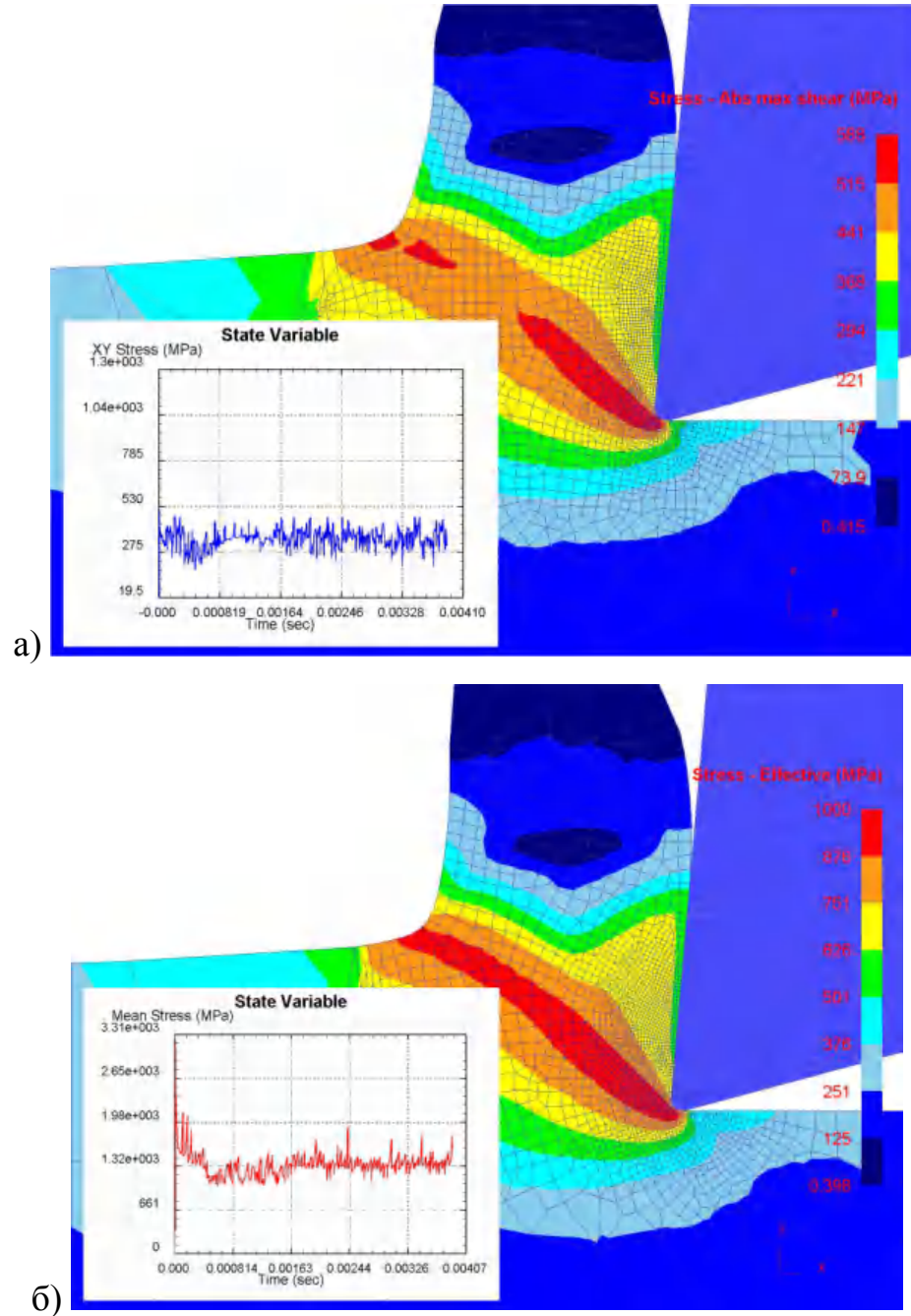


Рис.4.12. Картина реологічного формування вихідних даних для розрахунку деформаційної складової мікронерівностей профілю: а) τ_{xy} - динамічні напруження зсуву, МПа; б) $\bar{\sigma}$ - ефективне нормальне напруження, МПа (на прикладі токарного оброблення заготовки зі сталі 45; $V=120$ м/хв; $S=0,2$ мм $t=1$ мм)

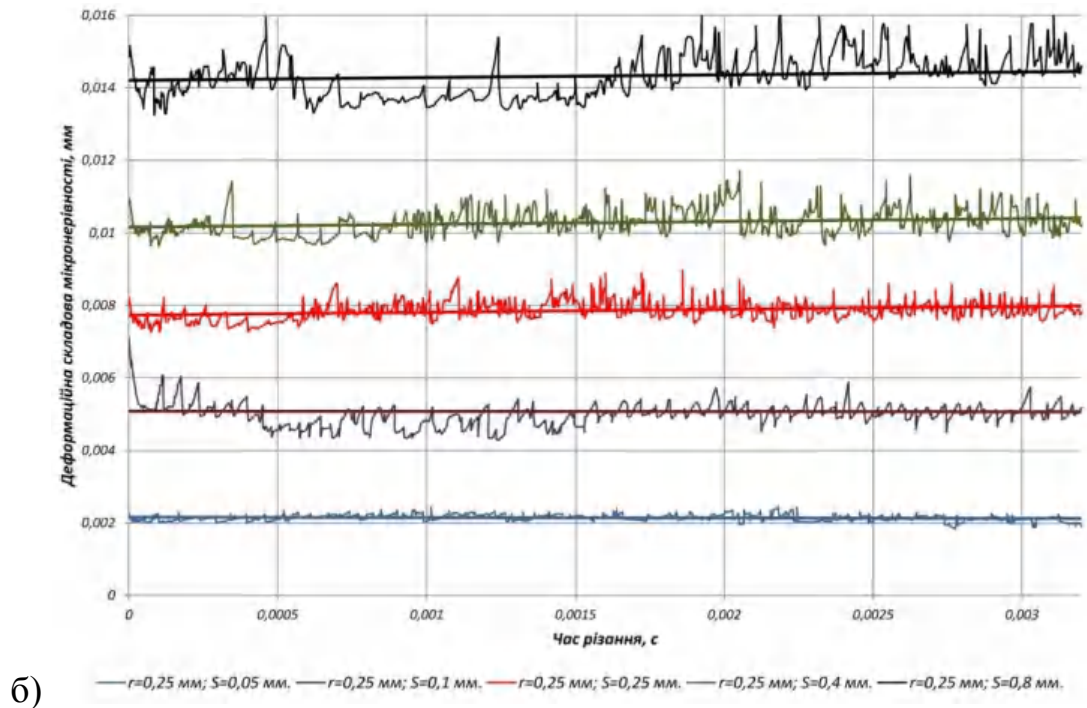
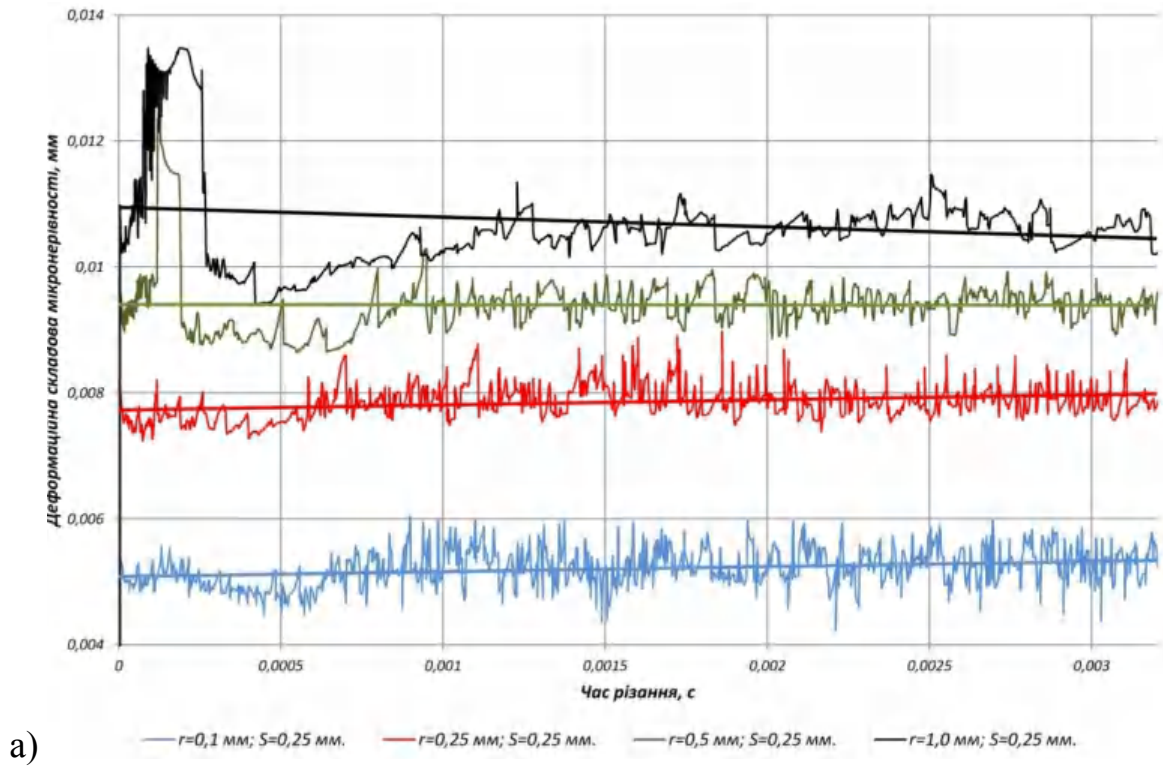


Рис.4.13. Результати моделювання деформаційної складової мікронерівностей профілю при обробленні сталі 45: (а) – залежність Δ_3 від радіусу при вершині інструменту; (б) - залежність Δ_3 від подачі інструменту.

Для аналізу впливу механічних властивостей різних оброблюваних матеріалів на формування деформаційної складової мікронерівностей, проведені порівняльні імітаційні реологічні дослідження оброблення сталі 45, алюмінієвого сплаву АД33 ГОСТ 4794-97 (аналог AL6061¹), та легованої сталі 34X2H2M (аналог сталі 4340¹) (Рис.4.14). Режими різання для всіх експериментів: подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв.; радіус при вершині інструменту $r=0,25$ мм [70, 285].

Результат моделювання підтверджує адекватність розрахункових даних реальним процесам різання: найбільші деформаційні зміни шорсткості поверхні характерні для пластичного м'якого матеріалу – алюмінієвого сплаву АД33, що в 1,8 рази перевищує аналогічну складову шорсткості при обробленні сталі 45 і в 2,6 рази – при обробленні корозійностійкої легованої сталі 34X2H2M (середньостатистичні значення Δ_3 – 9,2 мкм, 5,1 мкм та 3,5 мкм, відповідно). Це підтверджує формулу Мейера, згідно якої при втискуванні сферичного індентора в поверхню матеріалу зусилля P , що діє на нього, пов'язане з глибиною відбитку Δh по формулі [293, 294]:

$$P = m \left(\frac{4 \cdot \Delta h}{\pi} \right)^{n/2} \quad (4.23)$$

де m і n - коефіцієнти, залежні від властивостей оброблюваного матеріалу.

З іншої сторони, зусилля деформації, відповідно до теорії контактної взаємодії [167], залежить від твердості оброблюваного матеріалу і визначається з формули:

$$P = \text{HB} \cdot u \cdot \Delta h \quad (4.24)$$

де u – ступінь наклепу матеріалу деталі.

Наприклад, для конструкційних сталей при втисненні індентора радіусом 0,794 (що приблизно відповідає діапазону радіусів заокруглення різального

¹ Стандарт США ASTM 1008, євростандарт EN 730-1, стандарт Японії – JIS G4032.

леза), глибина пластичної деформації знаходиться в лінійній залежності від твердості і визначається за формулою [127]:

$$\Delta h = P \cdot (130 - \text{HRC}) \cdot 0,002 \quad (4.25)$$

де HRC – твердість матеріалу по Роквелу.

Якщо вимірюють твердість по Брінелю або по Вікерсу то апроксимуюча мікротвердість знаходиться у лінійній залежності від твердості. При вимірюванні твердості по Роквеллу — це ступенева залежність. Численні експерименти показали, що при вимірюванні твердості по Брінелю напруження описується рівнянням [124]:

$$\sigma_0 = (0,32 \div 0,37) \cdot \text{HB} \quad (4.26)$$

Отже, величина деформаційної складової шорсткості безпосередньо пов'язана з твердістю оброблюваного матеріалу, що і підтверджено результатами реологічного моделювання (рис.4.14) [70, 285].

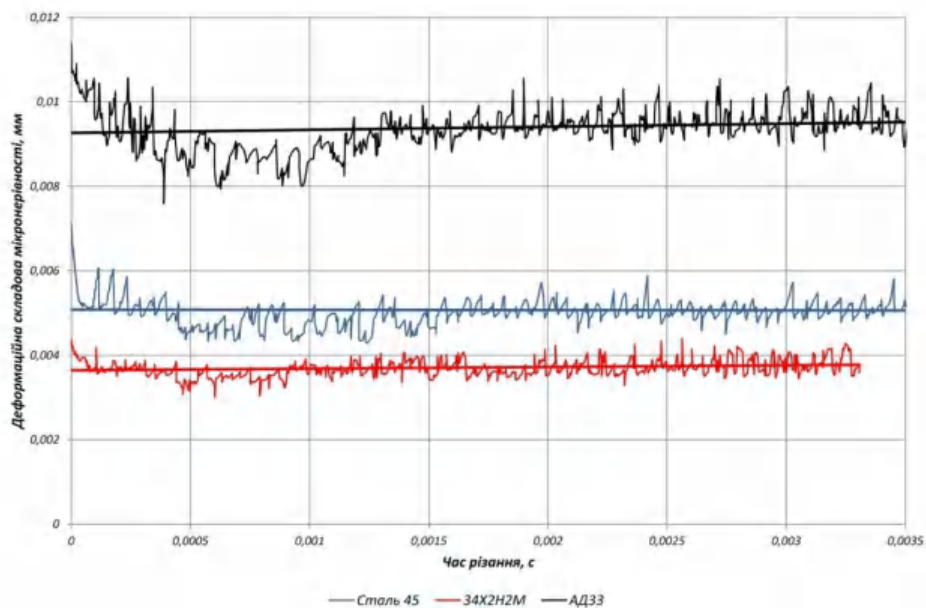


Рис.4.14. Графічна інтерпретація результатів моделювання деформаційної складової шорсткості поверхні при токарному обробленні заготовки зі сталі 45, алюмінієвого сплаву АД33 та корозійностійкої легированої сталі 34X2H2M (подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв)

Дослідження процесу формоутворення оброблених поверхонь дозволяють зробити припущення і отримати підтвердження про те, що процес формування мікрогеометрії поверхневого шару деталі визначається інтенсивними деформаціями за схемою стиску-розтягу та зсуву. Вони поширюються на зону стружкоутворення і трибоконтакти передньої і задньої поверхонь інструменту із стружкою і оброблюваною поверхнею. Деформації досягають глибин від 2...5 мкм до 15...25 мкм, і шорсткість стає залежною від напружено-деформованого стану, кінематики деформованих зон, а також від зародження, зростання і руйнування перехідних зон на трибоконтактах.

Таким чином, використовуючи можливості реологічного моделювання, можна зі значною мірою достовірності прогнозувати всі значущі складові мікронерівності профілю з врахуванням не тільки кінематико-геометричних параметрів процесу різання, але й таких важливих чинників, як динамічна зміна напружено-деформованого стану заготовки та вібрації системи ВПД (в т.ч. регенеративні) [70, 285].

4.2. Реологічна модель формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару заготовки при обробленні різанням

Фізико-механічний та структурно-хімічний стан поверхневого шару деталі (залишкові напруження та деформації, структурно-фазовий, механічний стан і хімічний склад тощо) в основному визначається післядією пружно-пластичної деформації, що відбувається в зоні стружкоутворення, температурним впливом та хімічною взаємодією оброблюваного матеріалу в зоні різання з матеріалом різального інструменту і зовнішнім технологічним середовищем (в т.ч. мастильно-охолоджувальною рідиною). При врзанні різального інструменту в оброблюваний метал хвиля пластичної деформації,

поширюючись попереду різального клину інструменту, охоплює не лише стружку, але і метал, розташований за лінією зрізу. Тому матеріал обробленої поверхні біля самої різальної кромки підлягає дії нормальної сили і сили тертя, що діє у напрямі лінії зрізу. Нормальна сила викликатиме напруження стиску, а сила тертя — напруження розтягу поверхневого шару, прилеглого до задньої грані інструмента (Рис.4.15). Тобто, поверхневий шар деталі підлягає неоднорідній пластичній деформації, монотонно затухаючій по глибині різання [299].

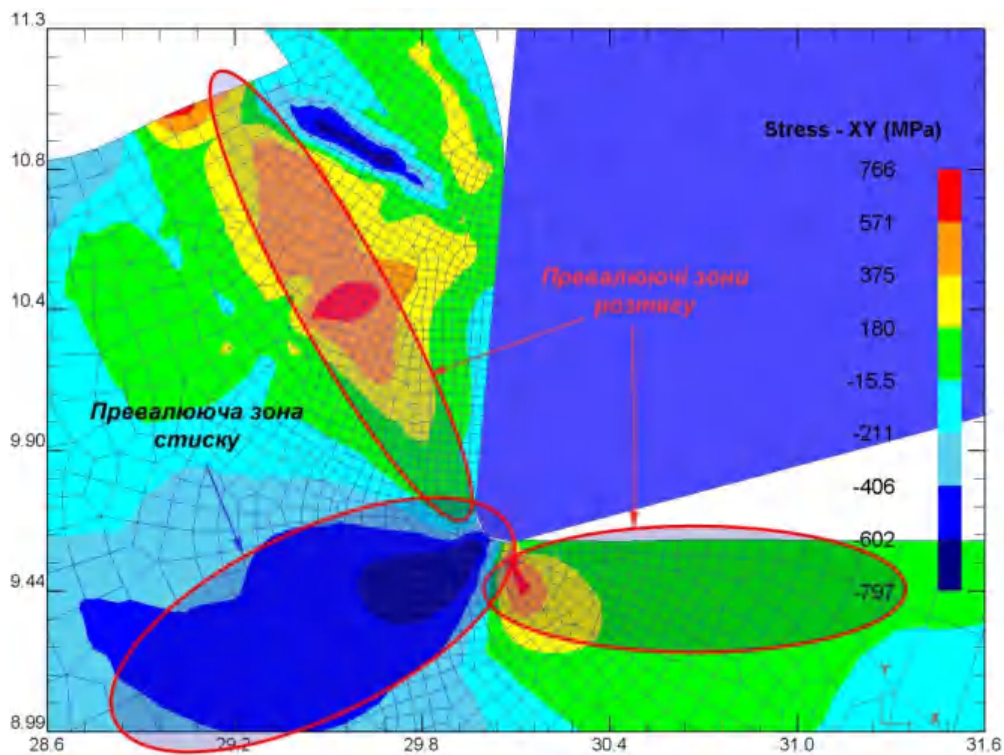


Рис.4.15. Імітаційна інтерпретація причинно-наслідкових чинників виникнення залишкових напружень I роду як інтерференції деформаційних явищ стиску та розтягу в зоні різання

Ще одна причина виникнення залишкових напружень полягає у аналізі термодинамічних та деформаційних глибоких процесів [291]. Зовнішній шар металу обробленої частини заготовки, нагріваючись в процесі різання, прагне лінійного розширення, проте цьому перешкоджає холодніший внутрішній шар,

отже, перший піддається стиску, а другий — розтягу. При інтенсивному нагріві поточні напруження $\bar{\sigma}$ на поверхні переважають межу текучості σ_T , що спричинює пластичну деформацію стиску зовнішнього шару металу. Під час подальшого охолодження, зовнішній шар прагне стиснутися до розмірів, менших первинних на величину додаткової пластичної деформації стиску. Цьому перешкоджатиме напружений внутрішній шар заготовки. В результаті в зовнішньому шарі виникнуть напруження розтягу, а у внутрішніх — напруження стиску (Рис.4.15). Таким чином, залежно від умов та режимів оброблення різанням, домінуючим може бути або механічний чинник, і тоді на обробленій поверхні превалюватимуть макронапруження стиску; або тепловий чинник, і тоді на поверхні переважаючими стануть макронапруження розтягу. Проте, цей алгоритм буде порушений, якщо процес різання супроводжуватиметься значними за інтенсивністю та глибиною фазовими перетвореннями, що є іноді сильнішим джерелом утворення макронапружень в поверхневих шарах, ніж механічний і тепловий чинники [285].

Недоліком адитивного аналітичного моделювання процесу утворення макронапружень є умовність в відокремленому розгляді впливу механічного або теплового чинників, залежність від експериментально визначених поправочних коефіцієнтів, а також те, що вона не враховує градієнт силового навантаження, що діє на поверхневий шар при обробленні деталі. Ця умовність не відповідає реальній картині виникнення макронапружень [299]. Єдиним шляхом аналізу досі вважалися методи експериментальних досліджень: рентгенографічний, експериментально-механічний (метод Н.Н. Давиденкова) та метод вимірювання мікротвердості (по М.М. Хрущову) [312]. Проблемно-орієнтований аналіз результатів відповідного імітаційного реологічного моделювання дозволить комплексно та адекватно оцінити картину взаємного впливу силового, механічного та металографічного чинника. Це сприятиме реалізації оптимальної, з точки зору мінімізації впливу залишкового напруження та

деформації, структури та параметрів технологічної операції оброблення деталей.

4.2.1. Реологічне моделювання та аналіз впливу технологічних чинників на формування залишкових напружень I роду

Наявність залишкових напружень та пластичних деформацій, генерованих внаслідок процесу різання, підтверджується результатами вимірювання мікротвердості [299]. Тонкий поверхневий шар деталей машин має інші механічні, фізичні, хімічні властивості і напружений стан, ніж в глибинній частині металу. Хоча глибина деформованого поверхневого шару, залежно від виду оброблення, знаходиться в межах від декількох десятитисячних до сотих і десятих долів міліметра, проте ця величина має визначальний вплив на триботехнічні властивості, а відтак і працездатність деталей машин. Як зазначалось вище, відмінність властивостей тонких поверхневих шарів від властивостей серцевини заготовки обумовлена сумою механічних, теплових і фізико-хімічних дій на поверхню металу і формується як результат силового та термодинамічного процесу, що супроводжує виконання технологічного переходу. Це призводить до зростання вільної енергії поверхні, збільшення її адсорбційної активності і інших змін, що мають істотний вплив на експлуатаційні характеристики деталі [327].

Особливо важливим є те, що пластична деформація супроводжується структурними змінами в матеріалі поверхневого шару. У кристалічній ґратці різко зростає кількість дислокацій, вакансій і інших дефектів. При різанні відбувається пластична деформація, що супроводжується подрібненням і витягуванням кристалічних зерен у напрямі деформації (утворення текстури), викривленням площин ковзання і появою на них уламків кристалічних зерен, виникненням міжкристалічних напружень [299]. Крім того, при обробці пластичних металів підповерхневий шар деформується не лише під впливом

силового поля передньої поверхні різця, але одночасно деформується під впливом стікаючої стружки. У зв'язку з тим, що інтенсивність пластичної деформації металу стружки значно вище за інтенсивність деформації металу під поверхнею зсуву (див. розділ 3), деформовані частки під впливом верхнього шару металу, що йде в стружку, додатково витягуються у напрямі стружки, і у момент відділення орієнтуються по відношенню до напрямку вектору швидкості під кутом більше 45° . При цьому збільшується питомий об'єм металу і знижується його густина, підвищуються межа міцності, твердість і крихкість, зменшуються пластичність і в'язкість, змінюються магнітні і деякі інші властивості металу [291].

Як зазначалось в розділі 3.4, в процесі оброблення деформація шарів оброблюваного матеріалу виникає не лише в області кута зсуву β , але і попереду різця і під площиною зсуву (рис. 3.27). Пластичній деформації передуює пружна. Тому пружнодеформовані шари матеріалу відновлюються так, що оброблена поверхня після проходження різця піднімається відносно площини різання на якусь величину h_z (Рис.4.16) На відміну від пружних, пластичні деформації призводять до того, що в поверхневому шарі деталі метал отримує наклеп або оброблювальну твердість, яка характеризується: 1) спотворенням кристалічної ґратки і виникненням внутрішнього залишкового напруження (рис.2.7); 2) сильним подрібненням зерен металу [34]; 3) появою текстури, тобто переважного орієнтування зерен в певному напрямі (рис.2.8, 2.9).

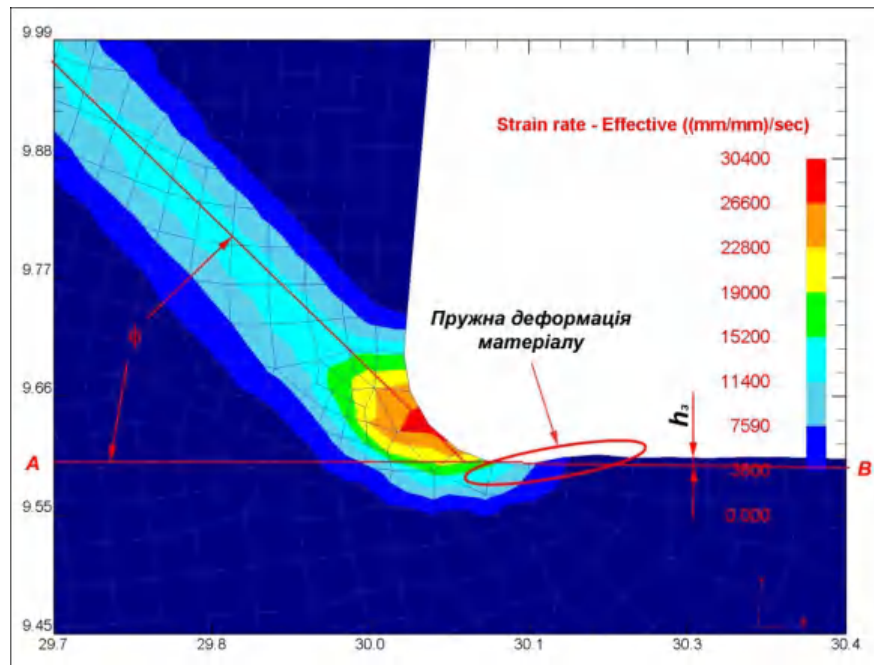


Рис.4.16. Реологічна картина пружної деформації металу в зоні задньої поверхні різального клина.

Реологічний аналіз термодинамічного процесу різання детально описаний в розділі 3.4. Відомо [241], що температура в зоні різання в межах $(0,25...0,3) T_{пл}$ викликає відпуск деформованого металу поверхневого шару, а температура вище $0,4 T_{пл}$ — його рекристалізацію, супроводжуючись частковим або повним зняттям деформаційного зміцнення ($T_{пл}$ — температура плавлення металу). Тобто, в процесі оброблення різанням в поверхневому шарі оброблюваної заготовки одночасно протікають два протилежні процеси: деформаційне зміцнення і термодинамічне розм'якшення. Фізичний стан поверхневого шару заготовки визначається співвідношенням інтенсивності і швидкості цих процесів. І аналітично описати цей динамічний процес вкрай складно [291, 294]. Зменшення дійсного значення межі текучості σ_T в порівнянні з σ_{T0} початкового матеріалу можна пояснити переважним впливом теплового чинника, що призводить до розм'якшення матеріалу. Збільшення напруження зсуву τ_{xy} матеріалу зрізуваного шару в порівнянні з τ_{xy0} початкового матеріалу можна

пояснити тим, що наявність випереджаючої зони деформації призводить до інтенсивного зростання густини дислокацій поблизу зони зсуву, а отже, і до зміцнення матеріалу. Це відбувається внаслідок того, що шари матеріалу від головного різального леза, вершинної частини радіуса леза і допоміжного різального леза нашаровуються один на одного при їх русі по відповідних площинах зсуву, тобто відбувається «самозаклинювання» шарів матеріалу кореневої зони стружки [92].

Очевидно, що інтерферентні залишкові напруження від всіх цих чинників є різноплановими і протилежними за знаками. Встановити домінуючий чинник і не враховувати інші – є складною задачею, що вимагає додаткових експериментальних досліджень. Крім того, в багатьох випадках дії всіх трьох чинників є приблизно рівнозначними і взаємопов'язаними. Тому можливості імітаційного реологічного моделювання – це єдиний шлях оперативного та адекватного аналізу впливу технологічних параметрів різання (структури технологічного переходу, режимів оброблення, вибору зовнішнього технологічного середовища тощо) на формування залишкових деформацій.

На Рис.4.17(а) наведений приклад реологічного 3D моделювання токарного оброблення деталі зі сталі 45 (аналог AISI 1045²) в системі Deform3D. Загальний шлях інструменту ($L=11,6$ мм) розділений на 24 діапазони вимірювань (Рис.4.17(б)) з метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ деформаційної складової післядії процесу оброблення.

В результаті реологічного моделювання можна встановити величини залишкових напружень ($\pm\sigma_s$), глибину їх залягання і закон розподілу. Очевидно, що в межах вирішення даної задачі моделюватись будуть тільки термдеформаційні залишкові напруження I роду (за класифікацією

² Стандарт США : ASTM A29, стандарт Японії JIS S 45C, Швеції: SS 1672

Н.І.Давиденкова), що виникають в процесі виготовлення деталі, які врівноважуються в об'ємі всієї заготовки або в об'ємі її макрочастин. Структурно-фазові залишкові напруження II роду формуються внаслідок фазової деформації окремих кристалітів, зерен і урівноважуються в об'ємі останніх. Реологічне моделювання таких процесів вимагає якісно іншої постановки задачі і буде розглянуто нижче (розділ 4.2.2). Напруження III роду врівноважуються в субмікрооб'ємах, співмірних з міжатомарними віддальми і не є домінуючими при формуванні поверхневого шару, як наслідок параметричного впливу технологічних чинників, а тому в даній роботі проводиться не будуть.

На Рис.4.19-4.21 наведені картини реологічного моделювання залишкових напружень I роду в результаті токарного оброблення деталі зі сталі 45 (аналог AISI 1045³) в системі Deform3D. Ці напруження, що виникають внаслідок утворення в поверхневому шарі дислокацій та дислокаційних стінок, експотенційно зменшуються в результаті термодинамічної релаксації із зростанням віддалі l від вершини різального клину вздовж обробленої поверхні повільніше, ніж $l^{2.5}$ [293] (Рис.4.22(б)). Глибина залягання пластичних деформацій визначається на основі вирішення задачі Прандтля [294] про те, що довжина пластично деформованої ділянки ι при втискуванні площинного індентора еквівалентна розміру Δ цього індентора:

$$\iota = \frac{\Delta}{\sqrt{2}} \quad (4.27)$$

³ Стандарт США : ASTM A29, стандарт Японії JIS S 45C, Швеції: SS 1672

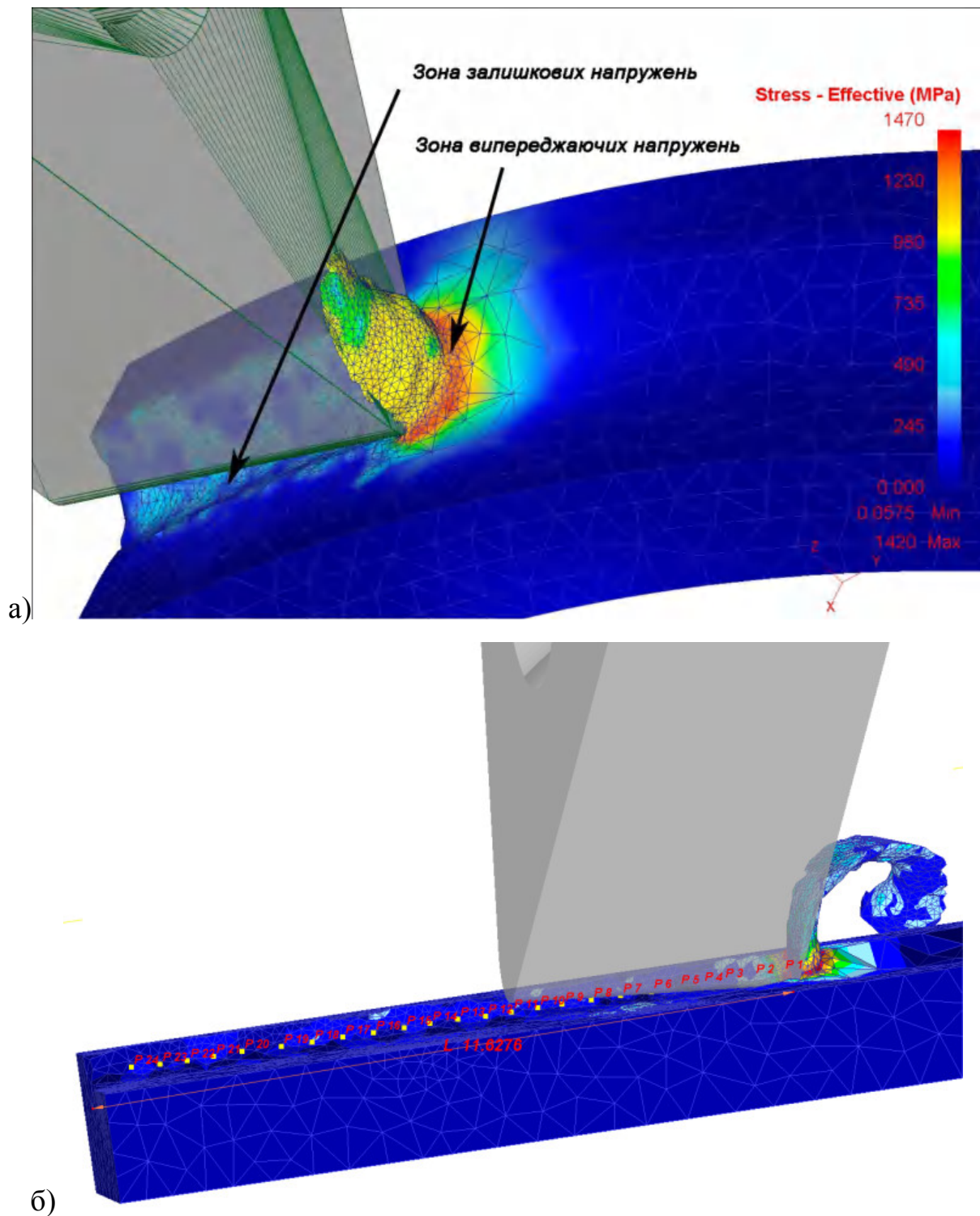


Рис.4.17. Приклад реологічного 3D моделювання токарного оброблення деталі зі сталі 45 в системі Deform3D

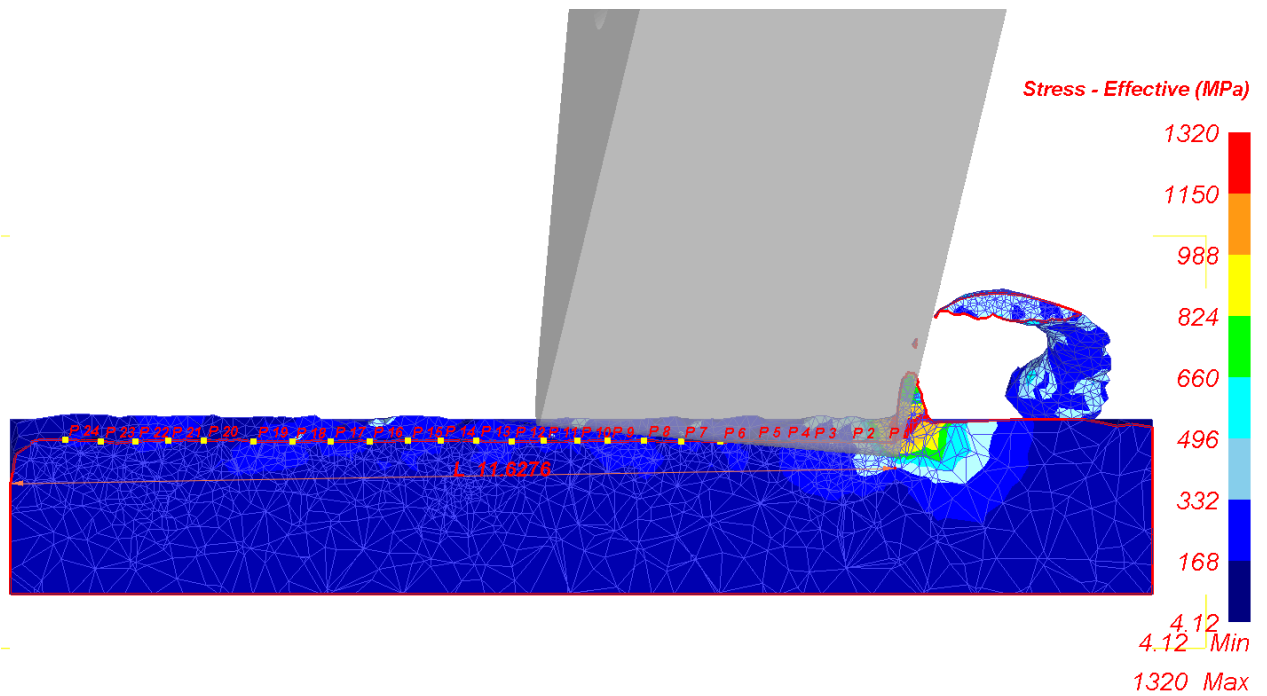


Рис.4.18. Картина реологічного 3D моделювання поточного напруження

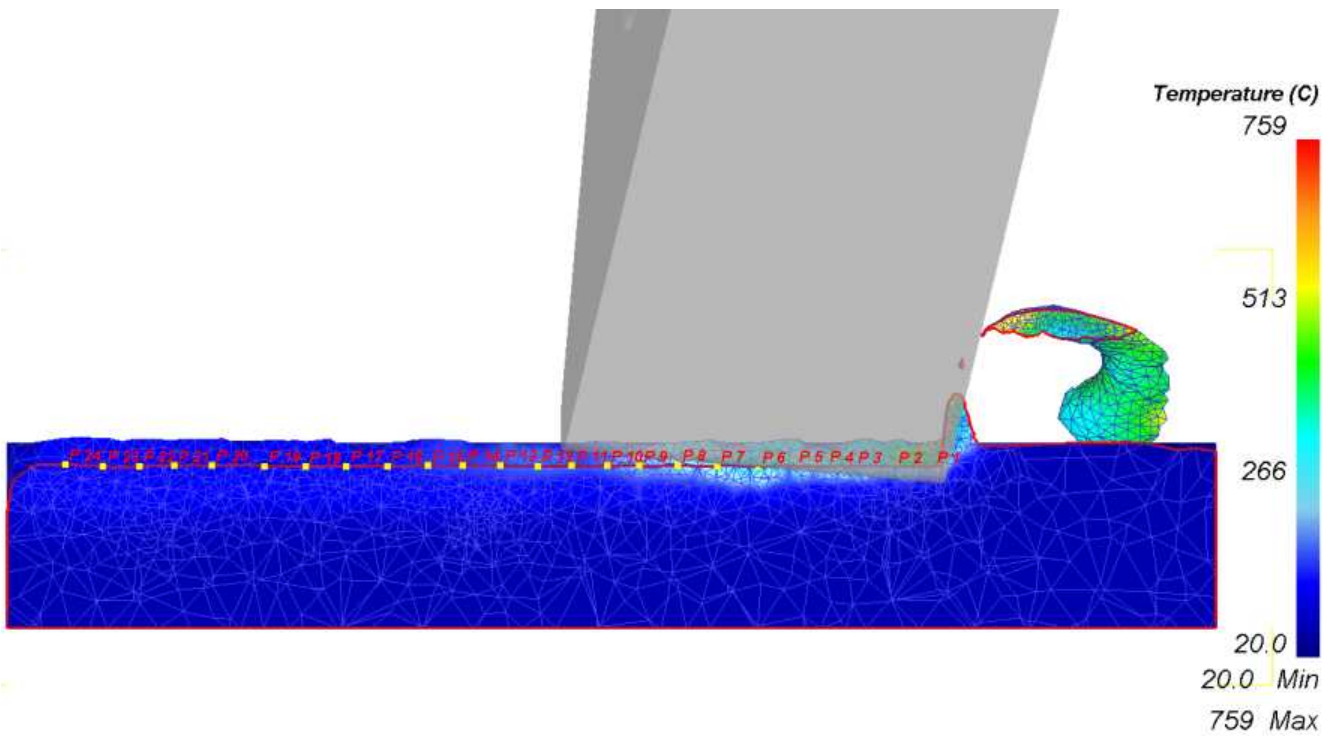


Рис.4.19. Приклад реологічного 3D моделювання термодинамічного стану заготовки в результаті оброблення

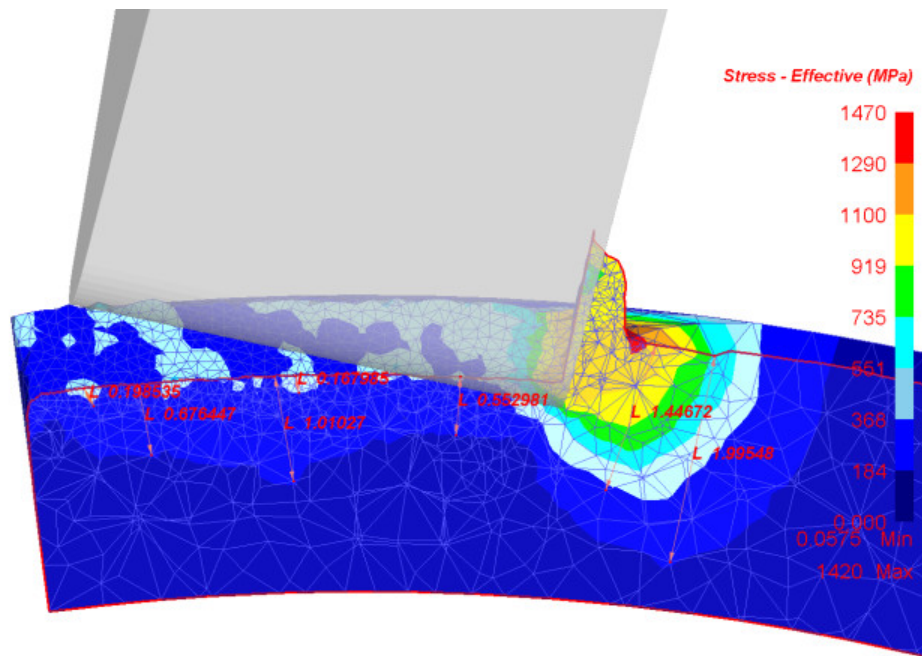


Рис.4.20. Глибина залягання залишкових напружень, що виникли в результаті виконання технологічного переходу токарного оброблення деталі зі сталі 45 (аналог AISI 1045) в системі Deform3D

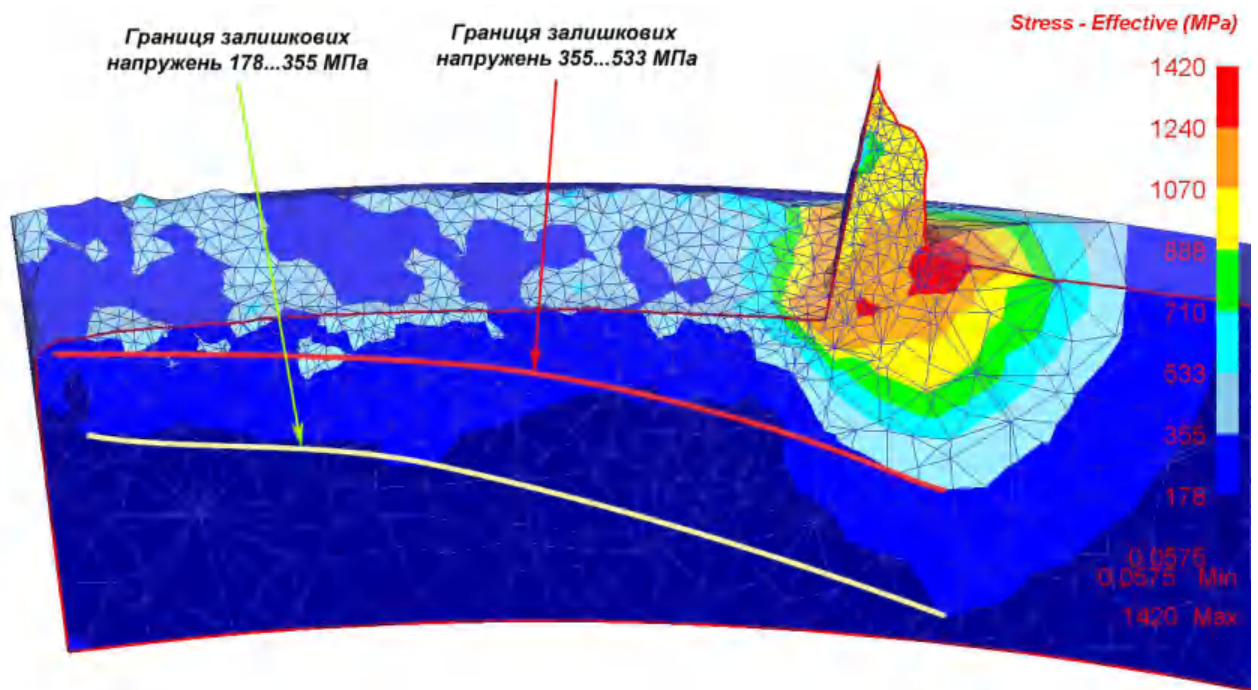


Рис.4.21. Ізостресовий аналіз залишкових напружень, що виникли в результаті виконання технологічного переходу токарного оброблення деталі зі сталі 45 (аналог AISI 1045) в системі Deform3D

Графічний аналіз результатів реологічного моделювання (Рис.4.20) дозволяє зробити висновки про те, що температурний режим оброблення носить експотенційний характер, що з високою мірою достовірності аналітично описується рівнянням:

$$T(l) = -0,045l^3 + 2,613l^2 - 54,251l + 514,34 \quad (4.28)$$

Причому стабілізація температури в межах 100°C наступає на віддалі 10-13 мм від вершини різального леза. Загальне охолодження до температури навколишнього середовища наступає протягом неспівмірно тривалішого часу (охолодження з 500°C до 100°C – час 0,003 с, а час охолодження з 100°C до 20°C приблизно 1700 с) і суттєвого впливу на формування залишкових напружень не має.

Крива термодформаційних напружень I роду (Рис.4.21) є більш складною, оскільки відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (фрикційних) та стискаючих (силових) навантажень та змінну картину глибинних термічних впливів. У зв'язку з цим при навантаженні деталі по знакосталому циклу стиску, що характерне для поступальної подачі різального інструменту, у вершині концентратора реально здійснюється знакозмінний цикл напружень, стискаюча частина якого визначається зовнішнім навантаженням, а розтягувальна - залишковими напруженнями. Як показав Л. Хаббард [299], пластична зона біля вершини концентратора не змінюється, а залишкові напруження розтягу від вершини різального клина зменшуються хвилеподібно по мірі її зростання. Цю картину наочно можна спостерігати на Рис.4.22(б). Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно 160 МПа при обробленні заготовки зі сталі 45.

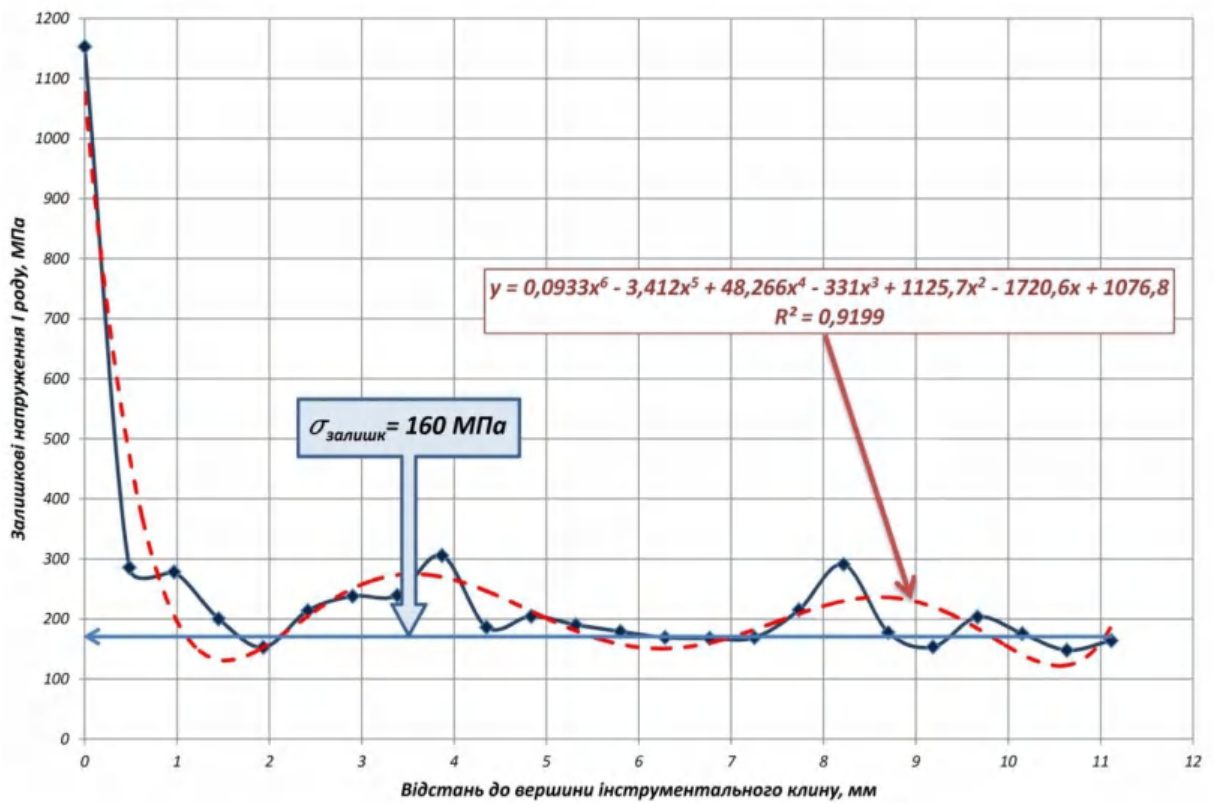
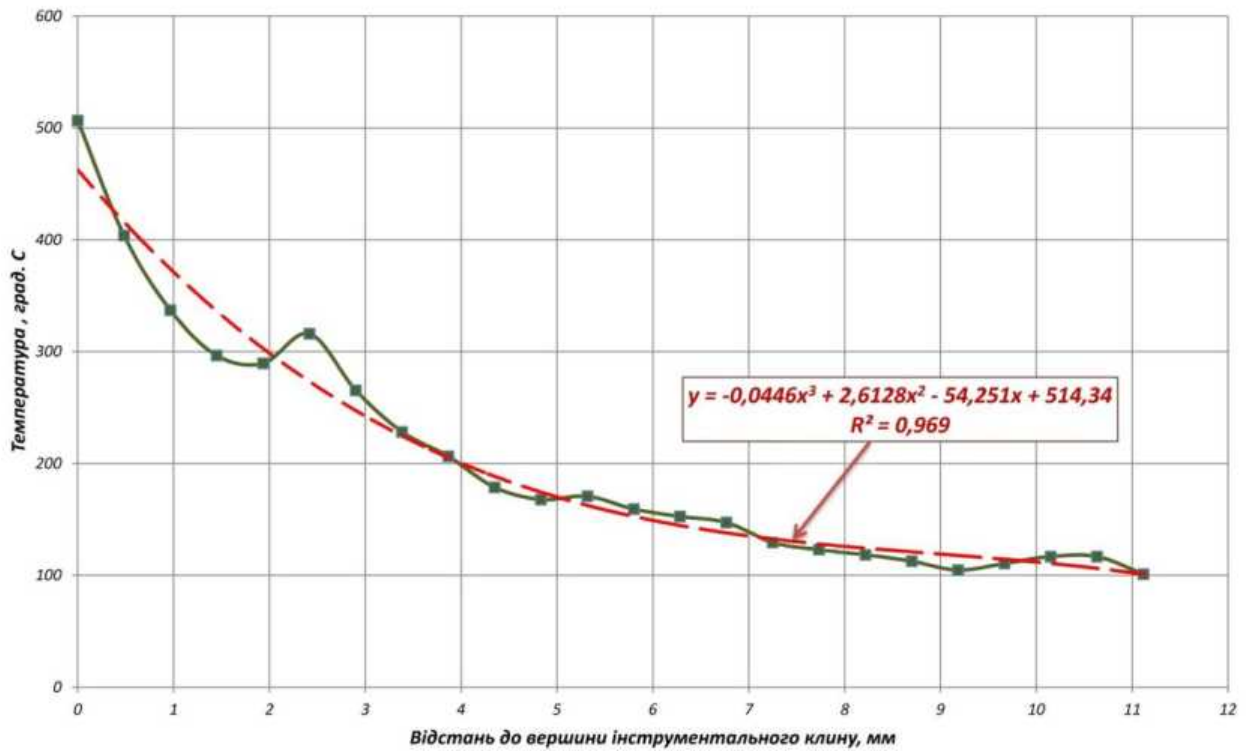


Рис.4.22. Графічні залежності температури та залишкових напружень І роду, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу токарного оброблення заготовки зі сталі 45

Аналіз впливу параметрів технологічних переходів – режимів різання, інструментальних матеріалів тощо на формування залишкових напружень I роду, проведений на основі реологічного моделювання в системі Deform 3D, дозволив виявити деякі закономірності. Вплив швидкості різання проявляється, перш за все, в зміні теплової дії і в зміні тривалості теплової і силової дії на інструмент. Тому підвищення швидкості різання сприяє появі додаткового розтягуючого напруження, яке збільшує загальну величину залишкових напружень розтягу. При обробленні низьковуглецевих сталей (наприклад – сталь 20), збільшення кількості теплоти в зоні різання, пов'язане з підвищенням швидкості різання, може призвести до загартовування поверхневого шару. Збільшення питомого об'єму металу поверхневого шару при його загартуванні призводить до зниження залишкових напружень розтягу, що формуються при малих швидкостях ($V=40\dots 80$ м/хв), і перетворення їх в напруження стиску при обробленні на великих швидкостях різання ($V>100$ м/хв). При обробленні середньовуглецевих (наприклад, сталь 45) та легованих сталей (34X2H2M) збільшення нагрівання поверхневого шару при збільшенні швидкості різання понад 120 м/хв може сприяти відпуску матеріалу. Внаслідок цього відбуваються структурні зміни, пов'язані зі зменшенням питомого об'єму металу, що призводить до зниження залишкових напружень стиску. Збільшення подачі при обробленні пластичних сталей, наприклад, жароміцних (ХН60Ю (аналог IN 718)), у яких формується залишкове розтягувальне напруження, призводить до зростання пластичної деформації поверхневого шару і відповідного зростання залишкових напружень розтягу.

Аналіз результатів імітаційного реологічного моделювання для фрезерування хромонікелевого сплаву IN 718, титанового сплаву Тi6AL4V та алюмінієвого сплаву AL 6061 (додаток Д) дозволяє зробити висновки про те, що середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації складатиме приблизно $\sigma_{зал} = 145\dots 150$ МПа при фрезерування

деталі з сплаву IN 718) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв); $\sigma_{зал} = 32...36$ МПа при обробленні деталі з титанового сплаву Ti6Al4V ($S=0,07$ мм; $t=0,2$ мм; $V=115$ м/хв) і приблизно $\sigma_{зал} = 22...26$ МПа при обробленні деталі з алюмінієвого сплаву AL 6061 ($S=0,1$ мм; $t=0,5$ мм; $V=800$ м/хв).

4.2.2. Реологічне моделювання та аналіз впливу технологічних чинників на формування залишкових напружень II роду

Місцеві залишкові мікронапруження II-го роду виникають в полікристалічних металах в процесі термодинамічних та деформаційних процесів високої інтенсивності в результаті взаємодії зерен [290]. До залишкових напружень II-го роду відносять також і напруження всередині окремого зерна, обумовлені мозаїчністю його структури, як результат взаємодії між окремими блоками. Ці напруження є наслідком неоднорідності фізичних властивостей різних компонентів полікристала, а також обмежених умов деформації окремого зерна і анізотропії властивостей всередині нього [26]. Головними причинами їх виникнення є фазові перетворення, що мають різні коефіцієнти лінійного розширення α , а також анізотропія механічних властивостей окремих зерен, що спричинює різницю величини α вздовж різних кристалографічних напрямків, а також розпад зерна на фрагменти і блоки при їх пластичній деформації [290,327].

При механічному обробленні деталей в їх поверхневих шарах обробленої поверхні деталі відбуваються зміни механічних властивостей і структури металу під тиском різального інструменту і під впливом теплоти, що виділяється при різанні. Фазові і структурні перетворення при обробленні інструментом можливі тільки для металів з метастабільною структурою. Залишкові напруження при механічному обробленні можуть досягати 560 МПа [222]. Теплота, концентруючись в поверхневих мікрооб'ємах, створює великий

температурний градієнт по глибині, в результаті швидкості нагріву і охолодження мікрооб'ємів більше, ніж при термічному обробленні. Білий шар виявляється при лезовому обробленні легованих сталей з HRC вище 45 одиниць при швидкостях різання вище 100 м/хв.

В результаті механічного оброблення при температурі різання, що перевищує 727°C відбувається фазове перетворення перліту на аустеніт відповідно до діаграми стану залізовуглецевих сплавів [24]. Це перетворення складається з двох одночасно протікаючих процесів: поліморфного (алотропного) — ферит переходить в аустеніт і відбувається розчинення перлітного цементиту в новоутвореному аустеніті. Механізм процесу перетворення перліту в аустеніт полягає в зародженні зерен аустеніту і їх зростанні. Початковий стан (структура) сталі - перліт-евтектоїдна суміш фериту і цементиту. Під час переходу через критичну точку на межі феритної і цементитної фаз утворюються центри кристалізації аустеніту. Новоутворені зерна аустеніту ростуть, і в них розчиняється цементит. В результаті поліморфного альфа-гамма-перетворення триває утворення нових зерен аустеніту. Процес закінчується заповненням об'єму колишнього перлітного зерна зернами аустеніту. Оскільки в кожному зерні перліту утворюється декілька зерен аустеніту, перетворення перліту на аустеніт супроводжується подрібненням зерна сталі [24].

В процесі механічного оброблення зона високої температури зміщується разом із інструментом, оброблена поверхня різко охолоджується і відбувається зворотне перлітне перетворення аустеніту [24]. Сталь переходить в двофазний стан: ферит і цементит вторинний. Продуктами дифузійного розпаду аустеніту в області температури до 550°C є феритоцементитна суміш пластинчастої структури (перліт, сорбіт, троостит) [327]. При подальшому охолодженні аустеніту відбувається його бездифузійне перетворення на мартенсит - пересичений твердий розчин вуглецю в альфа-залізі. При швидкому

охолодженні аустеніту мастильно-охолоджувальною рідиною в процесі різання до температури початку мартенситного перетворення (250 - 200°C) відбувається зворотна перебудова граток гамма-заліза в альфа-залізо. Максимальна розчинність вуглецю в альфа-залізі зазвичай не перевищує 0,02%. В новоутвореному мартенситі його буде стільки, скільки містилося в аустеніті сталі до початку перетворення. Мартенсит, в порівнянні з іншими фазовими структурами сталі, і особливо з аустенітом, має найбільший питомий об'єм. Це одна з головних причин виникнення досить великих за величиною та глибиною залягання внутрішніх напружень при механічному обробленні з подальшим різким охолодженням, що викликають деформацію оброблюваних деталей або навіть появу мікротріщин, що суттєво погіршують експлуатаційні властивості деталі. Таким чином, залежно від інтенсивності і тривалості силового та термодинамічного впливу на поверхневий шар обробленої деталі і його взаємодії з матеріалом різального інструменту і технологічним середовищем відбуваються фазові і мікроструктурні перетворення. Це і є причиною виникнення фазових залишкових напружень II роду [290].

Для аналізу впливу структурно-фазового чинника, слід сформулювати початкові умови. Нехай первинна (отримана до оброблення) структура поверхневого шару деталі була об'ємно однаковою і мала густину ρ_1 . Під дією температурного і деформаційного впливу в процесі різання, шар деталі глибиною $\Delta_z = R_1 - R_2$ піддався градієнтним структурно-фазовим перетворенням, в результаті чого після повного охолодження отримав нову структуру з густиною ρ_2 . Очевидно, що якщо густина ρ_2 перевищує початкове значення ρ_1 , то питомий об'єм матеріалу зменшується. Тоді, після охолодження розмір деталі R_1 зменшиться до R_2 , що і викличе залишкові напруження. Згідно із законом Гука тангенціальні напруження на поверхні деталі визначаються виразом [290,294]:

$$\sigma_{\phi} = E_M \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right), \quad (4.29)$$

де E_M — модуль Юнга матеріалу, МПа.

Слід зазначити, що серед основних структурних фаз конструкційних сталей найнижчу густину має цементит: $\rho_1 \approx 7700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а найвищу – аустеніт:

$\rho_1 \approx 8160 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Густина трооститу та перліту коливається незначно в межах :

$\rho_1 \approx 7760 \dots 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Густина феритної структурної фази - $\rho_1 \approx 7900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Таким

чином, якщо при механічному обробленні, наприклад загартованої сталі з мартенситною структурою в поверхневому шарі, виникне структура мартенсито-аустенітна або мартенсито-трооститна, то на обробленій будуть створені умови виникнення залишкового розтягуючого напруження, оскільки

$$1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} > 0$$

Об'ємний вміст мартенситної фази ζ_M відповідно до бездифузійної моделі фазових перетворень описується формулою Меггі [50]:

$$\zeta_M = 1 - \exp \left\{ \psi_1 T + \psi_2 C + \psi_{31} \sigma_m + \frac{\psi_{32}}{\sqrt{\sigma}} + \psi_4 \right\}, \quad (4.30)$$

де $\psi_1, \psi_2, \psi_{31}, \psi_{32}, \psi_4$ - константи, що характеризують певний оброблюваний матеріал (склад легуючих елементів, умови рекристалізації тощо);

T – температура в зоні аналізу структурного стану;

C – відсотковий вміст вуглецю;

$\sigma_m, \bar{\sigma}$ - середнє та еквівалентне напруження в зоні різання, МПа.

Структурний об'єм аустенітної фази ζ_A сталі визначався із спільного моделювання теплових полів і структурно-фазових перетворень при

безпосередньому використанні формальної теорії кінетики перетворень [177], що дозволяє вичислити об'ємну долю структурної складової за допомогою рівняння Аврамі-Джонсона-Мела [21, 51]:

$$\zeta_A = 1 - \exp\{-k \cdot \tau^n\} \quad (4.31)$$

де ζ_A - об'ємна доля аустенітної фази, що утворюється в результаті механічного оброблення;

k і n - кінетичні параметри, обчислення яких відбувається по кінетичних діаграмах розпаду переохолодженого аустеніту [55];

τ - час різання.

У відповідності до результатів наукових робіт проф.Рамеша та проф.Хана, проведених у технічному інституті штату Джоржія (США), встановлені залежності впливу напружень та деформацій на процес аустенітного та мартенситно-перлітного перетворення. Так, доведено, що при оброблення підшипникової сталі ШХ15⁴, внаслідок високої густини деформацій в умовах адіабатичного зсуву аустенітні перетворення наступають вже при температурі $T_s = 550^\circ\text{C}$, а замість класичного значення фазових перетворень $T_f = 732^\circ\text{C}$. Аналогічні явища характерні для оброблення високолегованих сталей та сплавів на основі титану, нікелю, вольфраму та молібдену. Натомість, оброблення низько- та середньовуглецевих сталей при дуотермічному механізмі формування стружки, повністю анігілює цей механізм і не має суттєвого впливу на формування залишкових деформацій II роду.

Таким чином, змодельовавши напружено-деформований та термодинамічний стан зони різання та маючи емпіричні коефіцієнти $\psi_1, \psi_2, \psi_{31}, \psi_{32}, \psi_4$ [26], можна здійснити реологічне моделювання залишкових напружень II роду в середовищі Deform HT2(HT3).

⁴ аналог AISI 52100 (США)

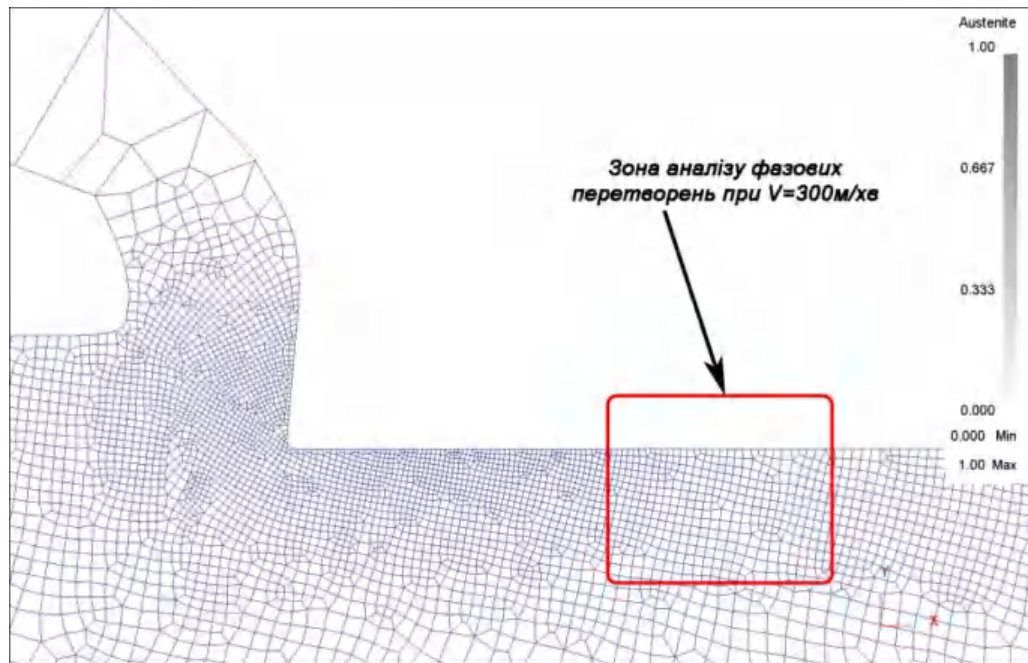


Рис.4.23. Приклад реологічної картини моделювання фазових аустенітно-мартенситних перетворень в системі Deform HT-2

Наприклад, при обробленні підшипникових кілець зі сталі ШХ15 (аналог AISI 52100 (США) використовуємо коефіцієнти для формули Меггі (4.30):

$$\zeta_M = 1 - \exp\{0,016T - 0,001223\sigma_m - 0,0010303\bar{\sigma} - 5,18\}$$

В даному випадку приймаємо, що «білий шар» має первинну мартенситну структуру з базовою твердістю 65HRC і становить не менше 68% фазового об'єму матеріалу. Інший об'єм (менше 32%) заповнює перлітна або бейнітна структурна фаза з базовою твердістю близько 30HRC. Під поверхнею білого шару спостерігається зона металу зі зниженою корозійною стійкістю. Ця зона вміщує переважно феритно-карбідну фазу, але з пониженим вмістом вуглецю, хрому і інших карбідотвірних елементів. Одночасно з утворенням білого шару виникає система внутрішніх напружень, яка призводить до розтріскування шару і викришування його окремих часток в період експлуатації деталі.

За результатами експериментальних досліджень проф. С.Хана [26], були отримані такі результати:

Табл.4.1 Результати експериментальних досліджень формування «білого шару» після лезового оброблення підшипникового кільця зі сталі AISI 52100

Швидкість різання (м/хв)	Сила різання (Н)	Дійсна сила різання (Н)	Глибина «білого шару», мкм	Мікротвердість «білого шару». ГПа
100	350	425	4,0	9,0
300	300	400	5,5	10,0

В результаті реологічного моделювання технологічного переходу токарного оброблення підшипникового кільця з матеріалу ШХ15 з варіативними режимами різання ($V=100\dots300$ м/хв; $S=0,1$ мм; $t=0,5$ мм; $n=1200$ хв⁻¹) інструментом (матеріал – ВК6, передній кут $\gamma=5^\circ$; задній кут $\alpha=8^\circ$) в системі Deform 2D отримані хромограми об'ємного фазового стану матеріалу (Рис.4.24)

Залишкові напруження II роду, що отримані в результаті фазових перетворень, розраховуються за формулою (4.29). Оскільки результати реологічного моделювання дозволяють визначити тільки відсотковий вміст мартенситної фази ζ_M , то можна умовно припустити, що інший об'єм займає перлітна фаза, тобто $\zeta_{II} = 100\% - \zeta_M$. Крім того, середньостатистичне значення густини ρ_Σ утвореної в результаті впливу термодинамічних та силових чинників різання обробленої поверхні з поліфазною структурою є еквівалентним густинам різних фаз ρ_i у відповідності до їх відсоткового вмісту ζ_i . Тобто:

$$\sigma_\phi(l) = E_M \left(1 - \frac{\rho_M \cdot \zeta_M(l) + \rho_{II} \cdot [100 - \zeta_M(l)]}{100 \cdot \rho_{II}} \right), \quad (4.32)$$

де $\sigma_\phi(l)$ – значення залишкового напруження II роду на глибині l [мкм] їх залягання на обробленій поверхні.

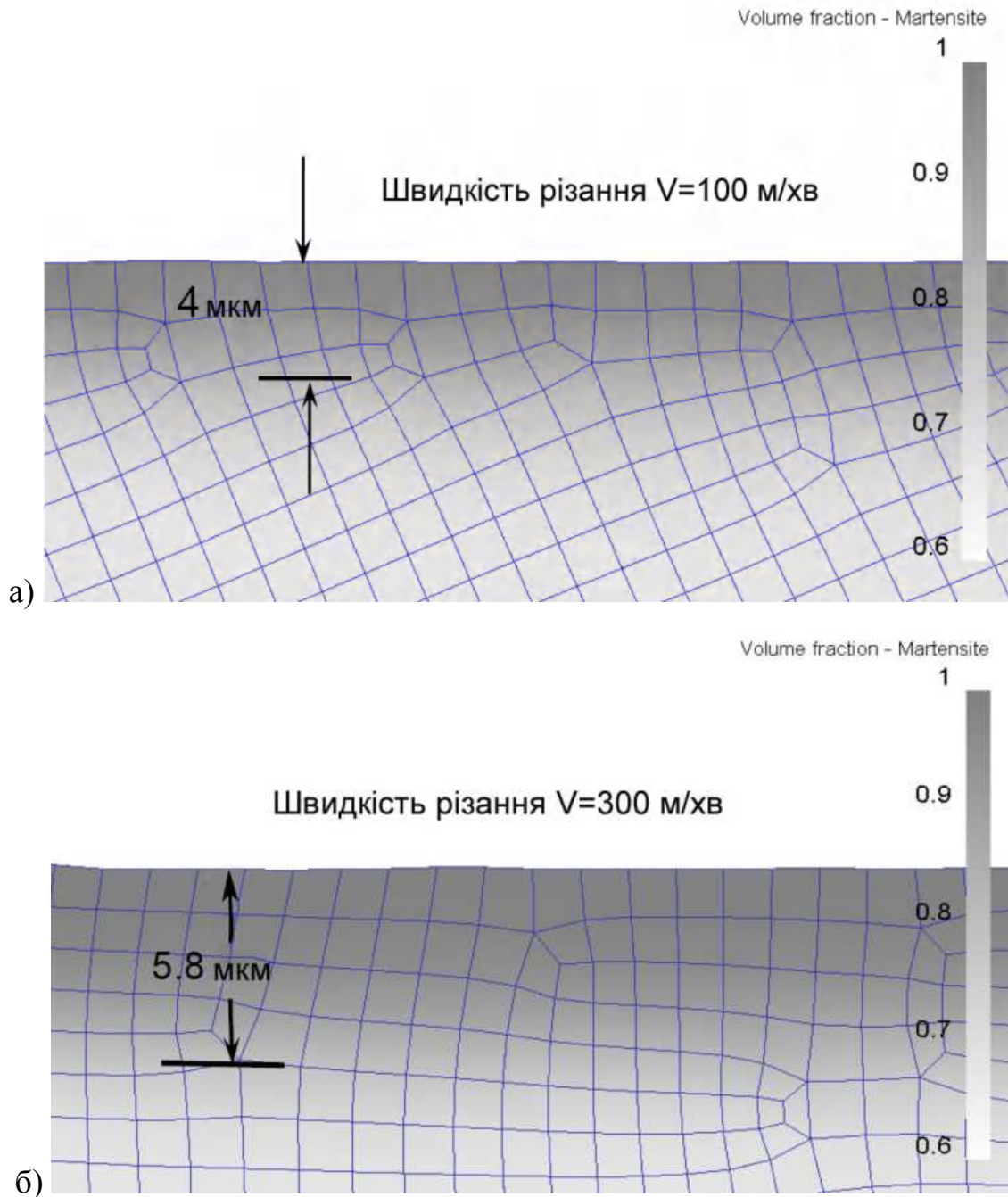


Рис.4.24. Хромограми об'ємного фазового стану матеріалу, отриманого в результаті реологічного моделювання технологічного переходу токарного оброблення підшипникового кільця з матеріалу ШХ15 з варіативними режимами різання ((а)- $V=100$ м/хв; (б) - $V=300$ м/хв) в системі Deform HT-2 [290]

Як бачимо, результати реологічного моделювання цілком корелюються з даними експериментальних досліджень проф. С.Хана [26] – Рис.4.25.

Формула (4.29) показує, що якщо новоутворена структура матеріалу з відповідним фазовим вмістом має більший питомий об'єм a , отже, меншу густину ρ_2 в порівнянні з густиною основного матеріалу деталі ρ_1 , то на обробленій поверхні деталі виникнуть залишкові напруження стиску. А якщо $\rho_2 > \rho_1$, то на поверхневому шарі виникнуть залишкові напруження розтягу.

У відповідності до результатів реологічного моделювання, наведених на Рис.4.24, залишкові напруження II роду визначені за формулою (4.32) подані на графіку – Рис.4.26 [290].

Таким чином, слід відзначити, що для сталей і сплавів, що знаходяться у метастабільному стані аустеніту спостерігається формування високодисперсної структури, що складається з початкової перлітово-бейнітної фази і новоутворених мартенситних доменів [98]. На вищенаведеному прикладі імітаційного моделювання реології технологічного переходу токарного оброблення деталі із сталі ШХ15 показано, що в процесі її термодинамічного вантаження в новоутвореній фазі формується мікрокристалічна структура, що складається з дезорієнтованих фрагментів початкової фази і мартенситних доменів. Різна здатність до мартенситної перебудови ґраток в структурно-нестійких сплавах на основі нікелю, вольфраму, титану і тому подібне залежить не лише від різниці зони різання по температурі від точки мартенситного перетворення, але і від ступеня деформації ґраток при перетворенні. Для сплавів NiTi, Ni - Al і ін. ця ступінь деформації ґраток складає близько 10-11% [98]

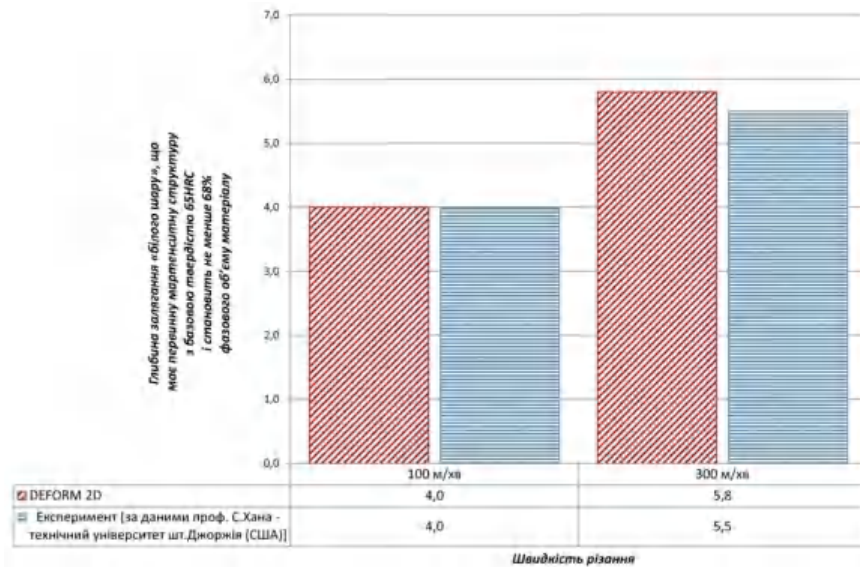


Рис.4.25. Порівняння розрахункових та експериментальних результатів реологічного моделювання технологічного переходу токарного оброблення підшипникового кільця з матеріалу ШХ15 з варіативними режимами різання ((а)- $V=100$ м/хв; (б) - $V=300$ м/хв) в системі Deform NT-2

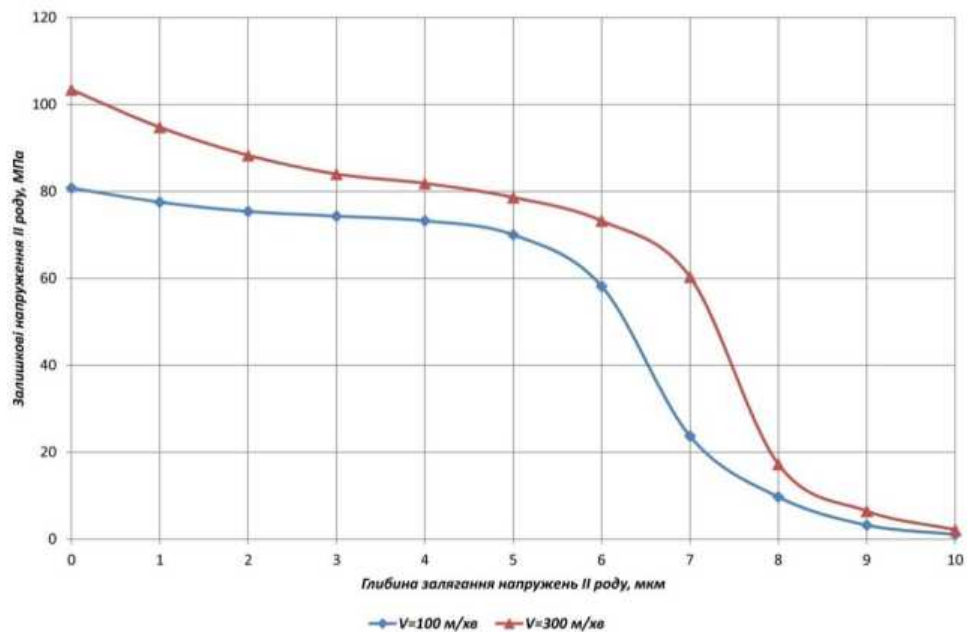


Рис.4.26. Графічні залежності залишкових напружень II роду, отриманих в результаті реологічного моделювання технологічного переходу токарного оброблення підшипникового кільця з матеріалу ШХ15 від швидкості різання

4.3. Моделювання залишкових деформацій, що формуються в результаті виконання технологічного переходу лезового оброблення деталі

Залишкові деформації (механічний наклеп) та неоднорідність властивостей, обумовлена, в першу чергу, нерівномірним розподілом накопиченої в результаті різання деформації. Деформаційна анізотропія, та пов'язані з цим залишкові макронапруження можуть суттєво знизити міцність виробу тих випадках, коли він в подальшому не підлягає термічному обробленню. Розрахунок залишкових напружень виконують за теоремою про розвантаження [124, 125, 263], згідно якого залишкові напруження після пластичної деформації дорівнюють різниці напружень при пластичній деформації і так званих розвантажувальних напружень, від яких матеріал позбавляється при розвантаженні. Якщо при розвантаженні відбуваються чисто пружні деформації, то можна визначати розвантажувальні напруження методами теорії пружності. У роботі [106] сформульований і доведений варіаційний принцип відносно залишкових напружень, що виникають внаслідок різання, проте він не знайшов практичного використання у технології машинобудування [263].

Наклеп матеріалу поверхневого шару оброблених поверхонь деталей характеризується його мікротвердістю і рентгенографічними показниками (розширенням або розмиттям інтерференційних ліній), що свідчать про дроблення кристалічних блоків, зростання спотворень кристалічної ґратки і розвиток дислокацій. Процес наклепу металу поверхневого шару розвивається під дією сил в зоні різання. При механічному обробленні в зоні різання одночасно діють значні зусилля різання, що створює наклеп, і температура, що викликає розм'якшення металу. В процесі оброблення точінням наклеп поверхневого шару підвищується при збільшенні подачі і глибини різання у

зв'язку із зростанням радіусу округлення різального леза і при переході від позитивних передніх кутів різця до негативних [258].

Одній з головних причин появи залишкових деформацій при механічному обробленні деталі слід вважати заокруглення леза інструменту. Насправді передня і задня поверхні зубів інструментів сполучаються не по лінії, а по поверхні, яка в перерізі є дугою кола радіусом r (Рис.4.27). Оскільки площина зсуву CD буде дотичною до кола радіусом r , слід зазначити, що метал нижче лінії FE підминається різальним лезом і в стружку не переходить. Деформований шар після проходження різця визначає глибину наклепу h_3 .

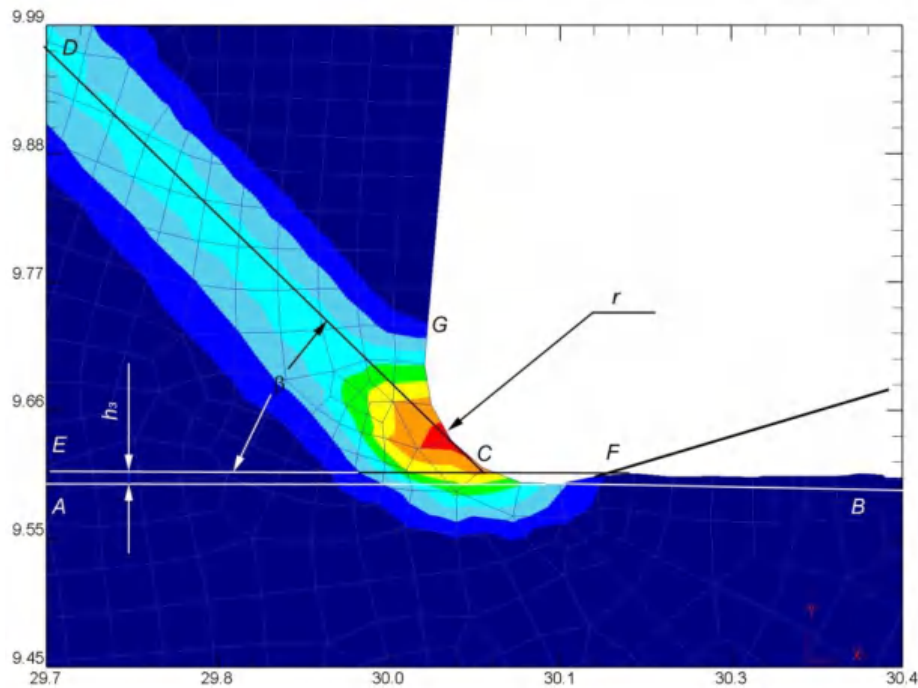


Рис.4.27. Схема формування деформованого шару на обробленій поверхні деталі на хромограмі інтенсивності розподілу деформацій в зоні формоутворення

Швидкість різання і подача мають найбільший вплив на деформацію поверхневого шару, оскільки ці параметри режиму різання визначають в основному механотермічну дію на метал. Зі збільшенням швидкості різання підвищуються швидкості деформації і температура нагріву, але зменшуються

тривалість дії напружень і час нагріву поверхневого шару заготовки. Зростаюче нагрівання деформованого металу зі збільшенням швидкості різання підвищує дифузійну рухомість атомів, активізує процеси розм'якшення внаслідок рекристалізації, знижуючи цим інтенсивність деформаційного зміцнення поверхневого шару [327].

В порівнянні з іншими параметрами режиму різання подача має найбільш суттєвий вплив на деформаційне зміцнення поверхневого шару. Залежності глибини і міри наклепу від подачі мають екстремальний характер, тобто існує оптимальна подача, при якій наклеп поверхневого шару має найменше значення. Оптимальна подача для жароміцних сплавів $S_o \sim 0,1 \dots 0,15$ мм/об [232]. Збільшення деформаційного зміцнення при зменшенні подачі за межами оптимальних значень подач пояснюється впливом процесу ковзання різального леза, що створює додаткову деформацію поверхневого шару. Характер цих залежностей визначається силовим навантаженням і температурою нагріву металу в зоні різання. Подача має найважливіший вплив щодо силової дії на поверхневий шар. При точінні, струганні і протягуванні зі збільшенням глибини різання основні параметри деформаційного зміцнення зростають [258].

Передній кут різця також впливає на умови стружкоутворення, які зумовлюють формування поверхневого шару. За даними проф. А. Д. Макарова [94], при точінні сплаву ХН77ТЮР зі зміною переднього кута від +15 до -15 глибина наклепу збільшується в 3 рази, що пов'язане з підвищенням опору руху стружки по передній поверхні різця.

Реологічне моделювання технологічного переходу токарного оброблення жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718), визначеної на основі аналізу імітаційної моделі в системі Deform 2D показав зниження характеристик наклепу на 55% у порівнянні з обробленням сталі 45 на режимах різання - подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм швидкість різання $V=120$ мм/хв. Зниженню наклепу в цьому випадку можуть сприяти підвищення міцнісних і

пониження пластичних властивостей сплавів і значне зменшення коефіцієнта тертя по задній поверхні різця.

Відомо, що ступінь наклепу визначається як відношення початкової H_0 і новоствореної H твердості оброблюваного матеріалу заготовки до її початкового значення:

$$N = \frac{H - H_0}{H_0} \quad (4.33)$$

При точінні жароміцних і жаростійких матеріалів ступінь наклепу може бути підрахований за емпіричним рівнянням проф.Сіліна [258]:

$$N = 40h_3\theta_0^{-0,72}, \quad (4.34)$$

де h_3 — глибина наклепу, що визначається за результатами реологічного моделювання технологічних переходів механічного оброблення, мкм (приклад поданий на рис.4.28);

θ_0 - температура в зоні різання при роботі твердосплавним інструментом, що також визначається за результатами реологічного моделювання.

Пластична деформація і наклеп поверхневого шару металу протікають в протилежно орієнтованих зернах різного складу з різною інтенсивністю; причому феритні зерна деформуються інтенсивніше за перлітні. Це викликає нерівномірне підвищення енергії і різну зміну електродного потенціалу [263]. При точінні більш наклепані феритні зерна та мартенситні домени стають анодами, менш наклепані перлітні зерна — катодами. З тих же причин виявляється різним і спотворення атомних ґраток в різних кристалічних зернах.

Наклеп поверхневого шару у більшості випадках виявляється шкідливим і знижує експлуатаційні якості деталей машин. Це відбувається тому, що після пластичної деформації металу поверхневого шару при кімнатній температурі збільшується його питомий об'єм і зменшується густина, що сприяє швидшому протіканню дифузійних процесів при високій температурі і тим самим прискорює процеси, що знижують опір металу динамічному руйнуванню.

Тривала дія високої температури на наклепаний метал швидко приводить до його інтенсивного розм'якшення, що знижує загальні експлуатаційні властивості деталей. Мікротвердість металу поверхневого шару відповідальної після її експлуатації при високій робочій температурі. Пониження густини наклепаного металу полегшує процес вигорання легуючих елементів жароміцних сплавів, яке призводить до зниження міцності сплавів [263]. Ознакою вигорання легуючих елементів може служити зміна параметра кристалічної ґратки жароміцного сплаву. Зі збільшенням міри і глибини наклепу жароміцних сплавів їх втомна міцність при роботі в середовищі з високою температурою значно знижується. Так, при глибині наклепу 190 мкм, що виникає при чорновому точінні, число циклів до руйнування сплаву при 700°C виявляється приблизно вдвічі нижчою, ніж після електрополірування, що не викликає наклепу. Різними експериментами було показано [263] істотне зменшення межі текучості жароміцного сплаву залежно від глибини наклепу, що виникає при різних видах оброблення.

На Рис.4.28 наведена розрахункова схема для визначення залишкових деформацій на 2D моделі технологічного переходу фрезерування деталі з інструментальної штампової сталі 4X5MФ1С (аналог AISI-H-13 (США)) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,1 мм; t=0,25 мм; V=120 м/хв). З метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ напружено-деформаційної складової післядії процесу оброблення загальний шлях інструменту по довжині обробленої частини деталі розділений на 22 діапазони, а по глибині – на 10 діапазонів вимірювань.

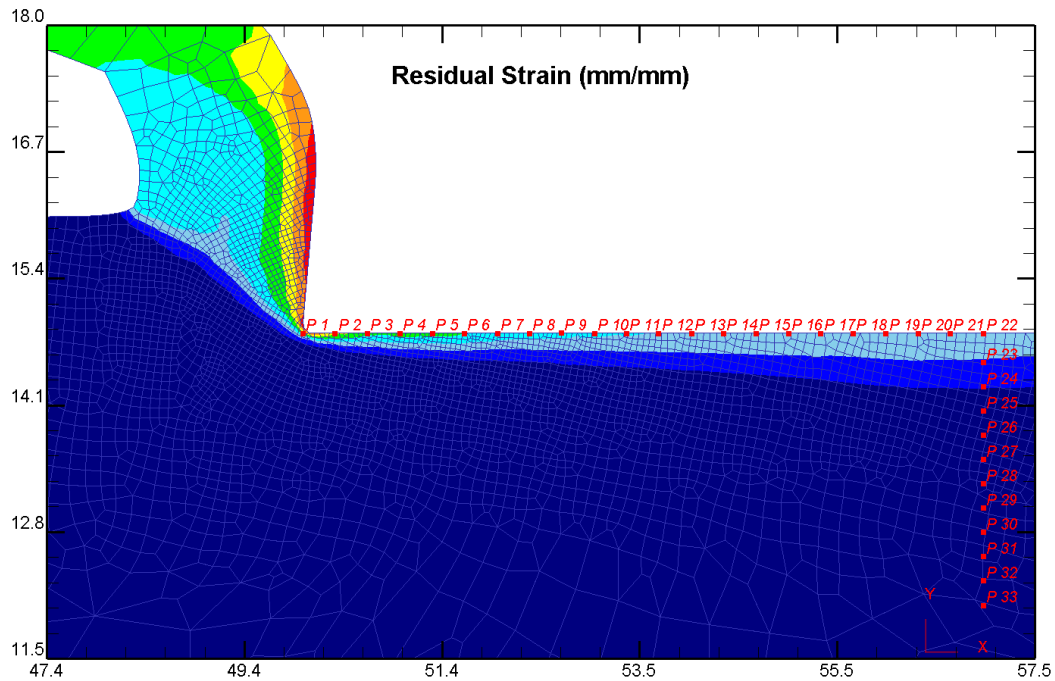


Рис.4.28. Розрахункова схема для визначення залишкових деформацій при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сталь 4X5МФ1С) ($S=0,1$ мм; $t=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

В результаті реологічного моделювання можна встановити величини залишкових напружень (ϵ_3), глибину їх залягання і закон розподілу. Формування залишкових деформацій по тестових точках зображено на Рис.4.29

На Рис.4.30 наведена картина реологічного моделювання залишкових деформацій при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сталь 4X5МФ1С) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,1$ мм; $t=0,25$ мм; $V=120$ м/хв). В результаті термодинамічної релаксації із зростанням віддалі від вершини різального клину вздовж обробленої поверхні ці деформації експотенційно зменшуються до якогось усталеного значення в зоні термодформаційної стабілізації. Саме ця величина і є залишковою деформацією.

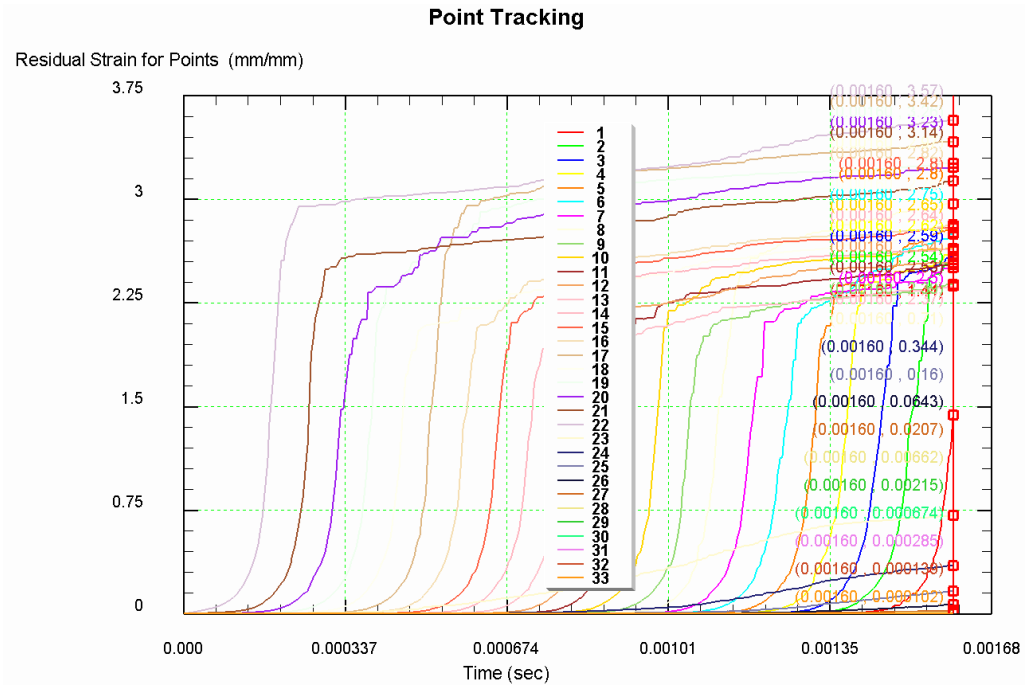


Рис.4.29. Графічна інтерпретація формування залишкових деформацій при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сталь 4X5МФ1С) по тестових точках

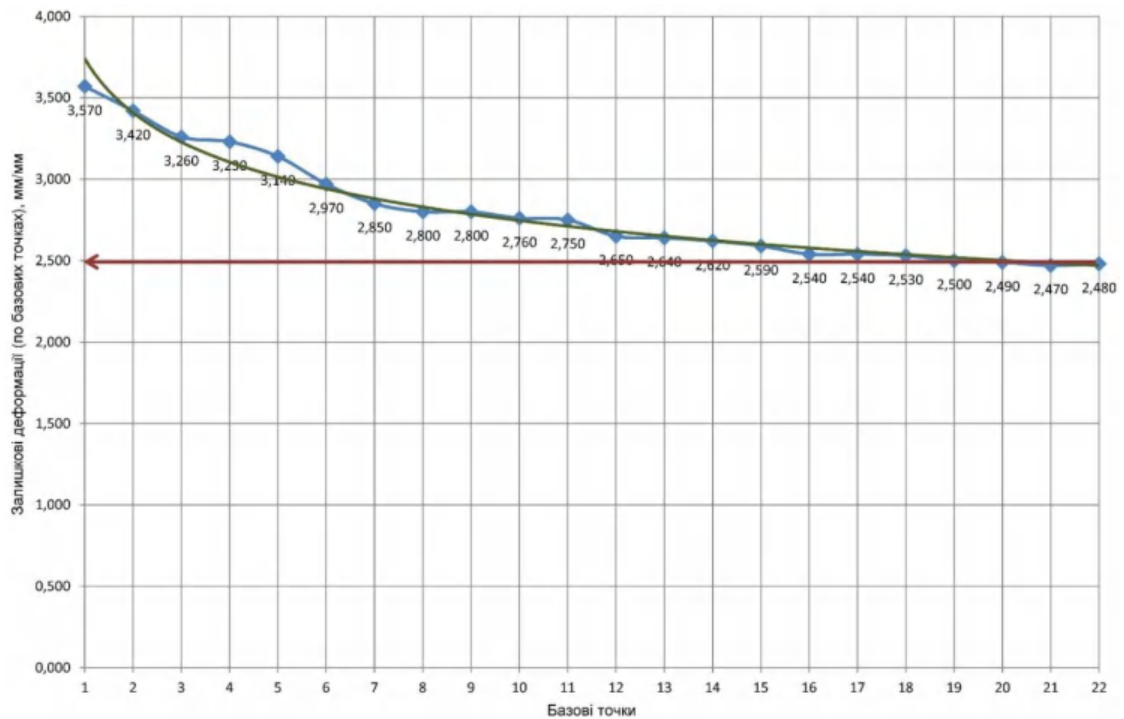


Рис.4.30. Графічні залежності поверхневих залишкових деформацій, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сталі 4X5МФ1С ($S=0,1$ мм; $t=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

Крива залишкових деформацій (Рис.4.30) відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних температурних, силових та фрикційних процесів, що виникають в процесі формоутворення деталі. Середньостатистичне значення залишкових деформацій в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно $\varepsilon \approx 2,5$ (мм/мм) при обробленні деталі з штампової сталі 4X5MФ1С фрезою CogoMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^{\circ}$, $\alpha = 15^{\circ}$ (S=0,1 мм; t=0,25 мм; V=120 м/хв).

Методика визначення глибини залягання залишкових напружень є подібною - але тестові точки вимірювання деформацій розташовані не по довжині обробленої поверхні, а вглиб (Рис.4.28). Очевидно, що моделювання картини глибини залягання також слід робити в зоні термічної стабілізації обробленої поверхні. Результати моделювання наведені на Рис.4.31.

Аналіз графічних залежностей доводить експотенційний характер зменшення залишкових деформацій: якщо на поверхні деталі ця величина становила $\varepsilon \approx 2,5$ (мм/мм), то на глибині 0,25 мм – вже $\varepsilon \approx 0,7$, а на глибині 1,0 мм деформація практично анігілюється і становить лише $\varepsilon \approx 0,06$ (мм/мм). Якісний та кількісний характер розподілу деформацій доводить адекватність та ефективність запропонованих методик для формування аналітичної бази при побудові функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

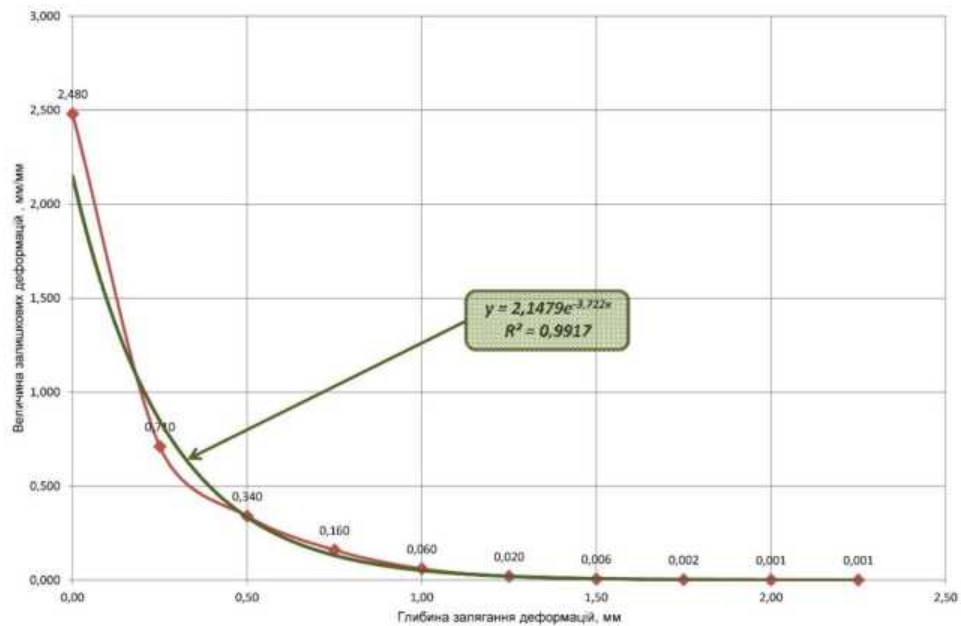


Рис.4.31. Графічні залежності глибини залягання залишкових деформацій, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сталі 4X5MФ1С ($S=0,1$ мм; $t=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

4.4. Експериментальні дослідження залишкових напружень та деформацій методом ультразвукової акустичної тензометрії

4.4.1. Мета та постановка задачі експерименту

Основною метою проведення експериментальних досліджень є оцінка взаємного впливу основних технологічних параметрів (режимів різання) на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталі лезовим інструментом. Крім того, вищенаведені моделі імітаційного реологічного моделювання проводились з деякими припущеннями, прийнятими при математичній інтерпретації процесів пластичного деформування (див. розд.2). Складний математичний апарат, що використовувався для вирішення систем диференціальних рівнянь та аналізу збіжності результатів МСЕ, передбачає використання наближених методів обчислення, що може позначитись на точності результатів розрахунку. Тому

для верифікації адекватності реальних даних та результатів імітаційного моделювання необхідно провести ряд експериментальних досліджень.

Вплив режимів різання на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталі представляють, як правило, у вигляді статичних залежностей [251], заснованих на проведенні експериментів по методиці одно- або багатофакторного експерименту. Переважним є багатофакторне планування експерименту [178], що дозволяє при проведенні малого числа дослідів в граничних точках області експериментування отримувати у вигляді математичних моделей вичерпний опис досліджуваного процесу. Залежність стискаючих чи розтягувальних залишкових напружень σ_{\pm} від досліджуваних чинників: швидкості (V), подачі (S) та глибини різання (t) буде мати вигляд:

$$\sigma_{\pm} = C_M \cdot V^{\alpha_{M1}} \cdot S^{\alpha_{M2}} \cdot t^{\alpha_{M3}} \quad (4.35)$$

де C_M – коефіцієнт, що враховує сумарний вплив неврахованих в рівнянні (4.35) чинників;

$\alpha_{M1}, \alpha_{M2}, \alpha_{M3}$ – показники ступеня при змінних чинниках.

Для рівняння (4.35) шляхом логарифмування слід привести в більш простій вид рівняння лінійної регресії, які для 3-факторного експерименту матимуть вигляд:

$$y_M = b_{M0} + b_{M1} x_1 + b_{M2} x_2 + b_{M3} x_3 + b_{M12} x_1 x_2 + b_{M13} x_1 x_3 + b_{M23} x_2 x_3 + b_{M123} x_1 x_2 x_3 \quad (4.36)$$

де $y_M = \lg(\sigma_{\pm})$ – логарифмічний вираз параметра σ_{\pm} (відгук моделі);

x_1, x_2, x_3 – змінні чинники в закодованому вигляді, відповідні режимам різання V, S і t, відповідно;

$b_{M0}, b_{M1}, b_{M2}, b_{M3}$ – коефіцієнти регресії при змінних чинниках, що є оцінками їх значущості;

$b_{M12}, b_{M13}, b_{M23}, b_{M123}$ – коефіцієнти регресії, що характеризують значимість взаємного впливу змінних чинників на досліджуваний процес.

Кодування змінних чинників x_1 , x_2 , x_3 в рівнянні регресії (4.36) здійснюється по наступних залежностях:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\lg V - \lg V_{\max})}{\lg V_{\max} - \lg V_{\min}} + 1 \\ x_2 &= \frac{2(\lg S - \lg S_{\max})}{\lg S_{\max} - \lg S_{\min}} + 1 \\ x_3 &= \frac{2(\lg t - \lg t_{\max})}{\lg t_{\max} - \lg t_{\min}} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

де V_{\max} , S_{\max} , t_{\max} відповідають максимальним значенням, а V_{\min} , S_{\min} , t_{\min} – мінімальним значенням змінних чинників при проведенні дослідів в граничних точках області експериментування.

Після знаходження коефіцієнтів регресії b_{M0} , b_{M1} , b_{M2} , b_{M3} в рівнянні (4.36) здійснюють оцінку їх значущості з виключенням з розгляду незначущих коефіцієнтів. Адекватність отриманої залежності (моделі) досліджуваному процесу оцінюють по F-критерію Фішера [178], розрахункове значення якого повинне бути більше його табличного значення для прийнятих умов експериментування.

4.4.2. Опис методики експериментальних акустотензометричних досліджень

Акустична тензометрія базується на явищі акустопружності, що полягає у зміні швидкості поширення пружних хвиль під впливом залишкових напружень, дефектів та деформацій поверхневого шару деталей [155]. Закон Гука, згідно якого напруження σ і деформація ε є пропорційними, виконується наближено. Більш точною є залежність ступеневого вигляду :

$$\sigma = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2, \quad (4.38)$$

де C_1 - модуль пружності, а C_2 - коефіцієнт Мурнагана.

Зміна швидкості проходження акустичної хвилі ΔV вздовж об'єкта дослідження є пропорційною напруженню або деформації поверхневого шару:

$$\Delta V / V = \varepsilon \cdot C_2 / C_1 \approx \sigma \cdot C_2 / C_1^2 \quad (4.39)$$

де V – ініційована швидкість поширення поверхневої акустичної хвилі (ПАХ)

Для визначення напружень використовувались релєївські поверхневі акустичні хвилі. Ці хвилі поширюються по поверхні зразка в шарі товщиною 1-2 Λ (де Λ – довжина ПАХ). При дослідженні використовувались хвилі частотою 3 МГц, що відповідає $\Lambda=1$ мм. Відстань між перетворювачами становила 15 мм. Похибка визначення швидкості становила менше 0.05%. При деформації розтягу швидкість збільшується, а при деформації стиску – зменшується. Найбільш складним етапом експериментальних досліджень є врахування похибок дослідження, що викликані внутрішніми дефектами, зміною текстури та власною анізотропією дослідного зрізця. Наприклад, текстура, що виникає при обробленні деталей з дюралюмінію Д16, може викликати зміну швидкості до 0,26%, а зміна швидкості під впливом залишкових напружень – близько 0,08%, для сталі 45 – 0,64% та 0,04%, відповідно [207]. З метою анігіляції цих чинників, лабораторні зрізці підлягали відпалу при температурі 360°C протягом 4 год у муфельній печі. Таким чином, залишкові напруження практично пропадають, а мікроефекти поверхневого шару залишаються. Тоді зміна швидкості проходження акустичної хвилі:

$$\Delta c = c_1 - c_2, \quad (4.40)$$

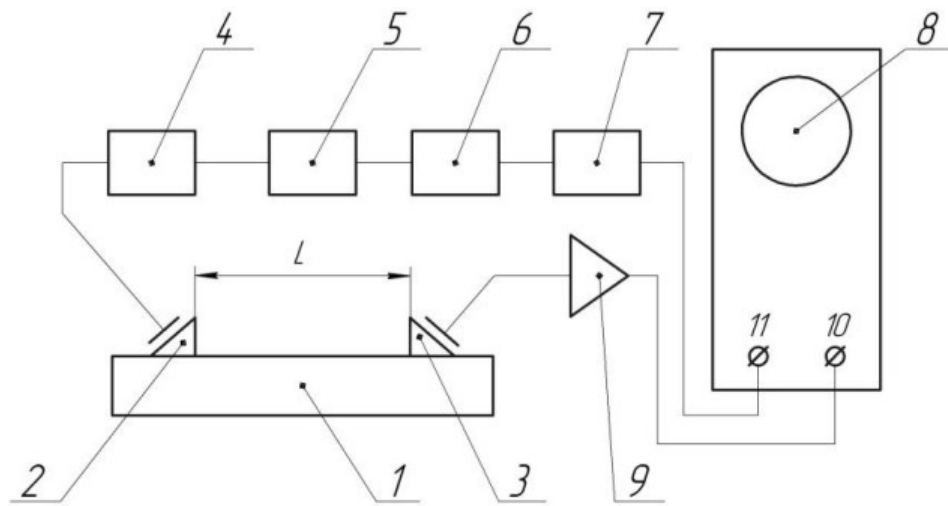
де c_1, c_2 - швидкість проходження арктичної хвилі до і після відпалу дослідного зрізця.

Для експериментальних досліджень використовувався метод контролю за допомогою акустичних хвиль, генерованих імпульсним методом збудження ультразвукових коливань. Використання імпульсного сигналу дозволяє застосувати жорстке, без демпфуючих прокладок, з'єднання п'єзоперетворювачів один з одним і підвищити тим самим точність вимірювань

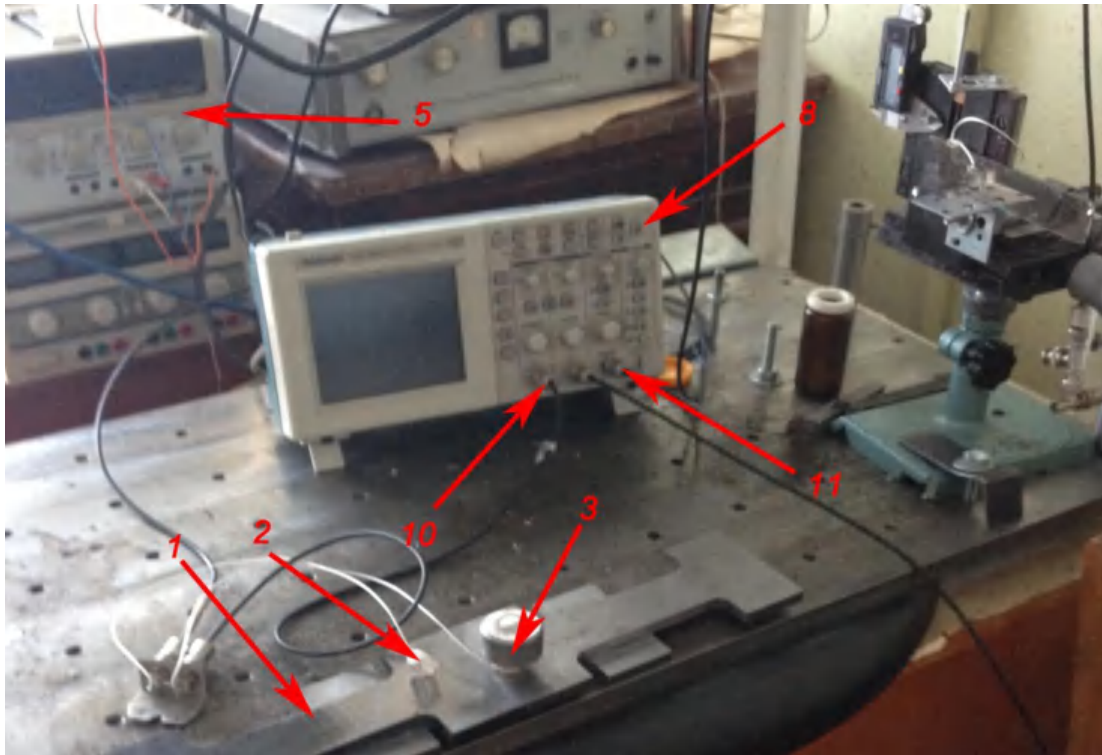
швидкості звуку за часом проходження імпульсом фіксованого відстані між збуджуючим і реєструючим п'єзоперетворювачами. Принцип дії імпульсного приладу з осцилоскопічною індикацією (рис. 4.39) полягає в наступному. Генератор імпульсів 5 формує короткі імпульси амплітудою 35 ... 100 В, які подаються на збуджуючий п'єзоперетворювач 2. Ультразвуковий імпульс проходить по досліджувальному взірці 1 і через проміжок часу τ досягає реєструючого п'єзоперетворювача 2, де трансформується у електричний імпульс, який посилюється підсилювачем 9 і подається на вхід 10 електронно-променевого осцилографа 8. При постійній швидкості розгортки положення імпульсу на екрані залежить від часу проходження ультразвуком відстані між п'єзоперетворювачами 2 і 3, а отже, від швидкості поширення ультразвуку у дослідному взірці. Запуск очікуваної розгортки осцилографа відбувається не в момент формування в блоці 5 імпульсу, а після закінчення проміжку часу τ_0 меншого за час τ проходження ультразвуковим імпульсом відстані між п'єзоперетворювачами (Рис.4.32). Тимчасова затримка сигналу здійснюється спеціальним блоком затримки часу 6, який запускається імпульсом, що надходять з генератора 5, і формує прямокутний імпульс тривалістю τ_0 .

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_1}{V_1} &= \beta_1 \sigma_{11} + \beta_2 \sigma_{22}; \\ \frac{\Delta V_2}{V_2} &= \beta_2 \sigma_{11} + \beta_1 \sigma_{22}; \end{aligned} \quad (4.41)$$

де V_1 і V_2 – швидкості ПАХ, які поширюються в напрямках 1(X) і 2 (Y); ΔV_1 і ΔV_2 – зміна відповідних швидкостей під дією механічних напружень; σ_{11} , σ_{22} – компоненти тензора залишкових механічних напружень; β_1 , β_2 – акустопружні коефіцієнти.



а)



б)

Рис.4.32. Принципова схема (а) та фотографія (б) експериментальної установки: 1 – досліджуваний зразок; 2,3 – збуджуючий і реєструючий п'єзоперетворювачі; 4 – тригер; 5 - генератор імпульсів; 6 - блок затримки часу; 7 - формувач імпульсів; 8 - електронно-променевий осцилограф; 9 - підсилювач; 10 – вхідний та вихідний конектори осцилографа.

Після закінчення часу затримки на виході осцилографа 11 з'являється імпульс негативної полярності, перетворений формувачем імпульсів 7 в імпульс позитивної полярності, який і запускає генератор очікувальної розгортки. Введення блоку затримки часу дозволяє істотно збільшити швидкість розгортки і тим самим підвищити точність вимірювань.

При дослідженні приймалось, що напруження лежать в площині зразка, тобто мають двохмірний характер. Напруження можна визначити з виразів

У випадку, коли напруження є одновісним його можна знайти з виразу

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \beta_1 \sigma_{11}; \quad (4.42)$$

Для визначення напружень необхідно знати акустопружні коефіцієнти β_1 , β_2 . Їх можна визначити експериментально, або скористатись літературними даними. В даному випадку було використано значення $\sigma_{11} = 0,4\%/100$ МПа.

Методика вимірювання напружень полягає у вимірюванні швидкості в зразку без напружень і в зразку з напруженнями (додаток Е). Різниця швидкості дозволяє визначити залишкове напруження згідно виразів (4.41) чи (4.42). Було використано два способи оцінки залишкових напружень. Перший полягав у нагріванні зразка до високих температур, що приводить до суттєвого зменшення напружень. Другий ґрунтувався на тому, що поблизу краю зразка напруження є суттєво менші ніж в середній його частині.

4.4.3. Планування та опрацювання результатів експериментальних досліджень

Приймаємо умови проведення експерименту – дослідження технологічної операції високошвидкісного фрезерування деталі з алюмінієвого сплаву AL 6061 фрезою CoroMill 300 ($\varnothing 200$ мм) з твердосплавною пластиною R300-1040D-PL S30T ($\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$). Діапазони досліджуваних чинників знаходиться в інтервалі: швидкості різання $V=600\dots 1000$ м/хв, подачі $S = 0,05\dots 0,5$ мм/зуб та глибини різання $t=0,25\dots 4$ мм. Ці значення змінних чинників і були прийняті

в експерименті як граничні точки області експериментування.

Факторний простір прийнятої області експериментування представлений на Рис.4.33 у вигляді куба, побудованого на координатних осях змінних чинників V , S і t .

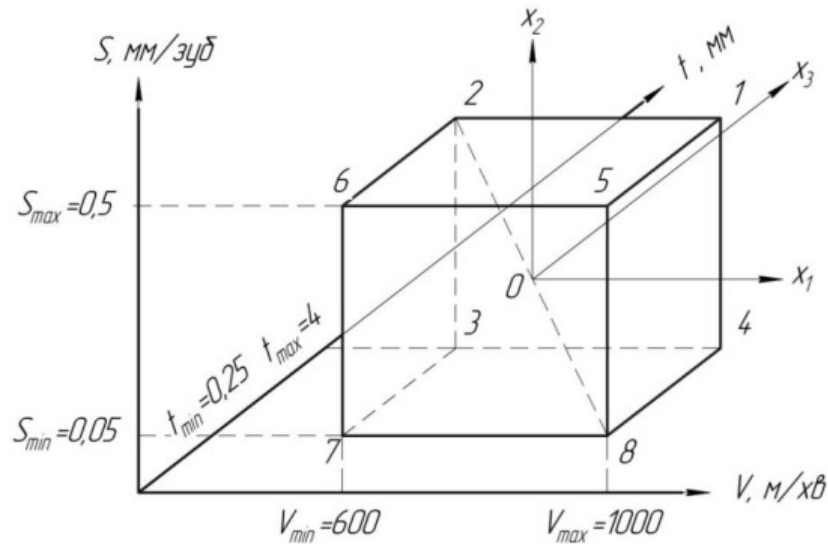


Рис.4.33. Графічна інтерпретація факторного простору з граничними точками (1-8) області експериментування.

По методиці проведення експерименту перенесемо початок координат в центр куба (т. 0) і присвоїмо новим осям значення x_1 , x_2 , x_3 , відповідні напрямкам векторів n , v і V . Точка «0» нових координат повинна відповідати основному «нуль»-рівню. Тоді максимальні значення змінних чинників V , S і t , відповідно закодовані як x_1 , x_2 , x_3 , в новій системі прийматимуть позначення як «+1» або просто «+», а мінімальні значення – як «-1» або просто «-». Точки вершини куба 1-8, що представляють максимально-мінімальні значення змінних чинників, є граничними точками області експериментування в досліджуваному факторному просторі. У табл.4.2 наведені числові значення рівнів варіювання і коди змінних чинників.

Табл. 4.2. Рівні варіювання і схема кодівих позначень змінних чинників

Рівень варіювання	Швидкість різання		Подача		Глибина різання	
	V, v/хв	x ₁	S, мм	x ₂	t, мм	x ₃
Основний	800	0	0,25	0	2,0	0
Верхній	1000	+1	0,5	+1	4,0	+1
Нижній	600	-1	0,05	-1	0,25	-1

Згідно методики проведення повного факторного експерименту з трьома змінними чинниками на двох (max-min) рівнях потрібно провести (по формулі [178] $N = 2^3$) вісім незалежних дослідів. Кожен з дослідів повинен відповідати граничній точці експериментування (т. 1-8 по рис. 3.4). Відповідно до прийнятої схеми розташування точок була намічена послідовність проведення дослідів.

У табл. 4.3 приведена матриця плану проведення експерименту, в якого рядки (1-8) відповідають дослідом, що проводяться, а стовпці x_j – чинникам незалежного і взаємного їх впливу по структурі рівняння (4.36). Знаку (+) відповідає максимальне значення чинника в експерименті, знаку (-) – мінімальне значення. Табл. 4.3 доповнена також даними розрахунку математичної моделі і є узагальнюючою таблицею, на яку надалі будуть відповідні посилання.

З метою підтвердження достовірності отриманого результату по кожному незалежному досліді, за рекомендаціями [178, 251] було проведено $k=3$ паралельних дослідів з вимірюванням кожного разу параметра залишкового напруження і обчисленням його середнього арифметичного значення, як

$$\bar{\sigma}_{\pm} = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^3 \sigma_{\pm k} .$$

Враховуючи побудову регресійного рівняння (4.36) в логарифмічних координатах, отримані експериментальним шляхом значення параметра σ_{\pm}

залишкового напруження, слід представляти як логарифм їх значень з символом y_{ik} , а середнє арифметичне - \bar{y}_i .

Оцінка відтворюваності паралельних дослідів в логарифмічному виразі здійснюється за G-критерієм Кохерна [178], згідно якому гіпотеза відтворюваності дослідів приймається, якщо розрахункове значення G_p -критерію буде менше його табличного значення, тобто:

$$G_p \leq G_T(p, N, f_i), \quad (4.43)$$

де p – рівень довірчої вірогідності, що приймається в експерименті; N – загальна кількість незалежних дисперсій (число дослідів); f_i – число ступенів вільності кожній з них.

Для прийнятих в експерименті умов дослідів: $p = 0,95$; $N = 8$; $f_i = k - 1 = 3 - 1 = 2$ табличне значення критерію Кохерна складає: $G_T(0,95;8;2) = 0,5157$.

Розрахункове значення G_p -критерію Кохерна визначається за формулою :

$$G_p = \frac{S_{i_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (4.44)$$

де S_i^2 - дисперсія відтворюваності кожного i -го незалежного дослідів;

$S_{i_{\max}}^2$ - максимальне значення дисперсії відтворюваності всіх дослідів;

N – загальна кількість дослідів ($N=8$).

Дисперсія відтворюваності по кожному дослідів визначається як:

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{k=1}^3 (y_{ik} - \bar{y}_i)^2, \quad (4.45)$$

де $k = 3$ – число паралельних дослідів.

Для систематизації розрахунків результати вимірювань параметра залишкового напруження σ_{\pm} , в експерименті оформлені і внесені до табл. 4.4.

Табл. 4.4. Результати досліджень залишкових напружень і оцінка їх відтворюваності у дослідах

№ досл.	Параметр σ_{\pm_k}				Логарифм параметра σ_{\pm_k}				Дисперсія відтворювано- сті S_i^2
	σ_{\pm_1}	σ_{\pm_2}	σ_{\pm_3}	$\overline{\sigma_{\pm_k}}$	Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	$\overline{Y_{ik}}$	
1	40,1	48,3	46,3	44,90	1,60	1,68	1,67	1,651	0,00179
2	34,3	39,2	31,7	35,07	1,54	1,59	1,50	1,543	0,00217
3	18,4	20,3	15,2	17,97	1,26	1,31	1,18	1,251	0,00408
4	23,5	29,4	21,9	24,93	1,37	1,47	1,34	1,393	0,00446
5	31,3	35,8	29,4	32,17	1,50	1,55	1,47	1,506	0,00191
6	20,4	18,5	22,3	20,40	1,31	1,27	1,35	1,308	0,00165
7	10,6	8,4	11,3	10,10	1,03	0,92	1,05	1,001	0,00459
8	16,5	19,1	15,6	17,07	1,22	1,28	1,19	1,231	0,00206
Сума дисперсій $\sum_1^8 (S_i^2)$									0,02271

В табл. 4.4 наведені результати вимірювання залишкових напружень і розрахунок дисперсій відтворюваності для дослідів № 1 – 8.

Повний розрахунок дисперсій відтворюваності в експерименті наведений в узагальнюючій таблиці матриці планування експерименту (табл. 4.5), з якої виходить, що максимальне значення дисперсії складає $S_{i_{\max}} = 0,0046$ (дослід №

7), а сума дисперсій $\sum_1^8 (S_i^2) = 0,0227$.

Розрахункове значення G_p - критерія Кохерна за даними табл. 4.5 складає:

$$G_p = \frac{0,0046}{0,0227} = 0,198$$

що менше табличного його значення, рівного $G_r(0,95; 8; 2) = 0,5157$.

Отже, гіпотеза відтворюваності дослідів в проведеному експерименті приймається, і отримані результати можна використовувати для подальших розрахунків параметрів моделі.

Розрахунок коефіцієнтів регресії $b_0, b_1, b_2 \dots, b_{123}$ здійснюється шляхом підсумовування по стовпцях матриці (табл. 4.5) експериментально набутих значень y_i з урахуванням знаку (± 1) при змінних x_{ij} відповідного стовпця по наступних залежностях:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i; \\ b_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot \bar{y}_i \end{aligned} \right\} \quad (4.46)$$

де $N = 8$ – число незалежних дослідів експерименту.

Результати розрахунків всіх коефіцієнтів подано в табл. 3.4.

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії здійснюється за допомогою t -критерія Стьюдента. Коефіцієнт регресії b_j статично значущий, якщо виконується умова [178]:

$$b_j \geq \pm t_{T(p, f_y)} S_{b_j}, \quad (4.47)$$

де $t_{m(p, f_y)}$ – табличне значення критерію Стьюдента;

S_{b_j} – середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів регресії.

При рівні довірчої вірогідності $p = 0,95$ і числі ступенів вільності дисперсії адекватності $f_y = N(k - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$, табличне значення критерію Стьюдента складає $t_{r(95, 0; 16)} = 2,12$ [178].

Табл. 4.5. Матриця плану, результати експерименту і їх математичне опрацювання

№ досліду	Матриця плану експерименту $N=2^3$								$\overline{\sigma_{\pm k}}$	$\overline{y_i}$	\hat{y}_i	$(\overline{y_i} - \hat{y}_i)^2$	S_i^2
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$					
1	+	+	+	+	+	+	+	+	44,90	1,651	1,6522	0,0014	0,00179
2	+	-	+	+	-	-	+	-	35,07	1,543	1,5449	0,0017	0,00217
3	+	+	-	+	-	+	-	-	17,97	1,251	1,2545	0,0031	0,00408
4	+	-	-	+	+	-	-	+	24,93	1,393	1,3968	0,0035	0,00446
5	+	+	+	-	+	-	-	-	32,17	1,506	1,5074	0,0015	0,00191
6	+	-	+	-	-	+	-	+	20,40	1,308	1,3096	0,0013	0,00165
7	+	+	-	-	-	-	+	+	10,10	1,001	1,0043	0,0034	0,00459
8	+	-	-	-	+	+	+	-	17,07	1,231	1,2321	0,0016	0,00206
$\sum_{N=1}^8$	10,90	-0,07	1,13	0,79	0,68	-0,01	-0,03	10,90	Рівняння регресії при $y = 1,363 + 0,141x_2 +$ $0,099x_3 - 0,084x_1x_2 +$ $+ 1,363 x_2 x_2.x_3$			0,0175	0,02271
$\frac{1}{N} \sum_{N=1}^8$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_1b_2	b_1b_3	b_2b_3	$b_1b_2b_3$				S_{ad}^2	$S_{\overline{y_i}}^2$
	1,363	-0,008	0,141	0,099	0,084	-0,001	-0,004	1,363				0,0011	0,0028

Середнє квадратичне відхилення коефіцієнтів регресії визначається з виразу:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S_{y_i}^2}{N}} \quad (4.48)$$

де $S_{y_i}^2$ – оцінка середнього значення дисперсії відтворюваності дослідів, тобто:

$$S_{y_i}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i^2), \quad (4.49)$$

де S_i^2 – дисперсія відтворюваності паралельних дослідів (див. табл. 4.4).

За результатами експерименту, наведеними в табл. 4.5, здійснимо оцінку значущості розрахованих коефіцієнтів. Середнє значення дисперсії відтворюваності паралельних дослідів в експерименті склало: $S_{y_i}^2 = 0,0076$.

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії в цьому випадку буде:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{0,0076}{8}} = 0,031.$$

Статично значущі коефіцієнти регресії повинні задовольняти умові:

$$b_j \geq \pm 2,12 \cdot 0,031 = \pm 0,065.$$

Як видно з табл. 4.5, цьому значенню інтервалу задовольняють коефіцієнти: $b_0 = 1,363$; $b_2 = 0,141$; $b_3 = 0,099$; $b_{12} = 0,084$, $b_{123} = 1,363$.

Вплив решти коефіцієнтів: b_1 , b_{23} та b_{13} , а отже, і взаємний вплив чинників x_1 , x_2x_3 та x_1x_3 на значення залишкових напружень є незначним вони виключаються з рівняння регресії. З урахуванням оцінки значущості коефіцієнтів рівняння регресії (4.36) прийме вигляд:

$$y = 1,363 + 0,141x_2 + 0,099x_3 - 0,084x_1x_2 + 1,363 x_2 x_2.x_3 \quad (4.50)$$

Перевірка адекватності отриманої залежності (4.50) експериментально отриманим даним по значенню залишкового напруження σ_{\pm} здійснюється за F-критерієм Фішера, розрахункове значення якого не повинне бути менше його табличного значення за прийнятих умов експерименту, тобто

$$F_p \geq F_T(p; f_{ad}; f_y) \quad (4.51)$$

При прийнятих в експерименті відомих $p = 0,95$, $f_y = 16$ і новій умові – числі ступенів вільності дисперсії адекватності, визначуваному, як $f_{ад} = N - (k + 1) = 8 - (3 - 1) = 4$, табличне значення критерію Фішера складає $F_{(0,95;4;16)} = 3,01$ [178]. Розрахункове значення критерію Фішера визначається з порівняння оцінок дисперсій:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (4.52)$$

де $S_{ад}$ – дисперсія адекватності;

S_y^2 – середнє значення дисперсії відтворюваності дослідів.

Дисперсія адекватності розраховується за формулою:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{f_{ад}} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = 0,02271 \quad (4.53)$$

$f_{ад} = N - (k + 1)$ – число ступенів вільності дисперсії адекватності.

Розрахункові значення відгуків моделі y_i визначаються підсумовуванням по рядках всіх значущих коефіцієнтів b_j з урахуванням знаку (± 1) при змінних чинниках x_{ji} , що обумовлені режимами проведення дослідів. Результати розрахунку відгуків та їх розбіжності з експериментальними даними оформлені у вигляді табл. 4.5. Дисперсія адекватності математичної моделі з урахуванням раніше певного числа ступенів її вільності, як $f_{ад} = 4$, складе:

$$S_{ад} = \frac{0,0175}{4} = 0,0043$$

Розрахункове значення задовольняє F - критерію Фішера, оскільки:

$$F_p = \frac{0,0227}{0,0043} = 5,27 > F_T(p; f_{ад}; f_y) = 3,01.$$

Ця умова є основою для прийняття моделі (4.50) як робочої при опису залежності параметра залишкових напружень від режимів різання в дослідному факторному просторі. Проведені експериментальні залежності в достатній мірі адекватні результатам реологічного імітаційного моделювання процесу лезового оброблення деталі з алюмінієвого сплаву AL 6061 наведеного в додатку Д.

Висновки до розділу 4.

1. Стан поверхневого шару характеризується його твердістю, мікроструктурою, величиною та знаком залишкових напружень і глибиною їх залягання. Фактори, що впливають на шорсткість обробленої поверхні, також впливають і на її пластичну деформацію. Таким чином, пластична деформація, величина наклепу і висота складових мікронерівності профілю обробленої поверхні мають фізичний зв'язок, що аналітичне встановлення якого здійснено на основі аналізу імітаційного реологічного моделювання. Ідея функціонально-орієнтованого проектування полягає у визначенні та аналізі висотних та крокових параметрів мікронерівностей оброблюваних поверхонь деталі необхідному для вирішення задачі вибору такої структури та параметрів технологічних операцій та переходів, що забезпечать оптимальний комплекс функціональних властивостей цієї деталі в умовах її потенційної експлуатації

2. В процесі формоутворення деталей виникають вимушені коливання системи верстат-заготовка-інструмент, що викликані динамічною дією зовнішніх сил, і автоколивання системи. Саме автоколивні процеси за частотою є найбільш значущими при формуванні вібраційної складової мікронерівності. Цей процес відбувається внаслідок розбалансованості внутрішньосистемних чинників – відставанням зміни сили різання від зміни товщини зрізу і динамічною характеристикою величини сили різання, що зменшується при зростанні швидкості різання. Причому, висота мікронерівності поверхні буде тим більша, чим більшою є подвоєна амплітуда коливання леза інструменту щодо оброблюваної поверхні. Механізм виникнення автоколивань проілюстрований на прикладі аналізу реологічної імітаційної картини різання, що демонструє зміщення за фазою максимально-мінімальних значень кута зсуву і радіальної складової сили різання. З врахуванням регенеративних коливань, дійсна товщина злізу a стає змінною величиною, що залежить від постійної заданої величини глибини різання a_1 і динамічної складової a_2 , що формується за рахунок мікро- та макронерівностей, які утворені в результаті деформацій поверхневого шару деталі після попереднього технологічного

переходу або внаслідок похибок у виготовленні заготовки. З метою визначення вібраційної складової мікронерівності профілю побудована нелінійна динамічна модель автоколивачів технологічної системи, що також враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому переході. У моделі сили різання залежать від геометричних параметрів інструменту і механічних характеристик ортогонального різання. Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB розраховуються амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи, що дає можливість встановити величину вібраційної складової мікронерівності.

3. Висота мікронерівності профілю оброблених поверхонь обумовлюється також і деформаційними процесами в зоні формоутворення. Ця складова є інтеграційно-залежною від функціонування системи різання, що визначається процесами взаємодії трибоконтактів, що закінчуються утворенням вторинної перехідної пластично деформованої зони. При чистових і фінішних технологічних переходах цей чинник має переважаюче значення. Складність аналітичної формалізації деформаційної складової мікрорельєфу ускладнена використанням апарату теорії пластичності та нелінійної термодинаміки, що викликає необхідність у ряді допущень, які суттєво знижують достовірність отриманих результатів досліджень. Для вирішення цієї проблеми слід розглянути явище пластичного витиснення, як частковий випадок вирішення задачі Прандтля. Розглядається вид деформування поверхонь, що настає, коли контактні напруження перевищують межу текучості і матеріал обтікає проникне контртіло в контактній зоні пари тертя «інструмент - оброблювана заготовка». Фізично це явище при різанні може бути викликане подовжньою і поперечною пластичною деформацією відносно геометрії (співвідношення головного φ і допоміжного φ_l кута в плані, радіусу r при вершині інструменту) та кінематики різальної кромки інструменту. Використовуючи результати реологічного імітаційного моделювання процесу різання згідно вищенаведеної методики, можна розрахувати значення деформаційної складової

мікронерівності профілю будь-який момент процесу стружкоутворення. Аналіз результатів дослідження дозволяє зробити висновки, про те, що величина деформаційної складової мікронерівностей зростає як із збільшенням радіусу r при вершині інструменту, так і від подачі інструменту S . Причому, зростання саме подачі S більш суттєво позначається на результатах формування деформаційної складової Δ_3 . Так, зростання радіусу при вершині в 10 разів (з 0,1 до 1,0 мм) спричинює збільшення величини деформаційної складової мікронерівності лише в 2,2 рази – з 5 до 11 мкм. В той же час збільшення подачі з 0,05 до 0,8 мм сприяло зростанню Δ_3 в 7 разів (з 2 до 14 мкм).

Результат моделювання процесу оброблення деталей з найбільш репрезентативних машинобудівних матеріалів підтверджує адекватність розрахункових даних реальним процесам різання: найбільші деформаційні зміни шорсткості поверхні характерні для пластичного м'якого матеріалу – алюмінієвого сплаву АД33, що в 1,8 рази перевищує аналогічну складову шорсткості при обробленні сталі 45 і в 2,6 рази – при обробленні корозійностійкої легованої сталі 34Х2Н2М (середньостатистичні значення – 9,2 мкм, 5,1 мкм та 3,5 мкм, відповідно). Дослідження шорсткості оброблених поверхонь дозволяють зробити припущення і отримати підтвердження про те, що процес формування мікрогеометрії поверхневого шару деталі визначається і супроводжується інтенсивними деформаціями за схемою стиску і зсуву. Вони поширюються на зону стружкоутворення і трибоконткти передньої і задньої поверхонь із стружкою і оброблюваною поверхнею. Деформації досягають глибин від 2...5 мкм до 15...25 мкм, і деформаційна складова мікронерівності стає залежною від напружено-деформованого стану, кінематики деформованих зон, а також від зародження, зростання і руйнування перехідних зон на трибоконтктах.

4. При різанні відбувається пластична деформація, що супроводжується подрібненням і витягуванням кристалічних зерен у напрямі деформації (утворення текстури), викривленням площин ковзання і появою на них уламків кристалічних зерен, виникненням міжкристалічних напружень. При цьому в

поверхневому шарі оброблюваної заготовки одночасно протікають два протилежні процеси: деформаційне зміцнення і термодинамічне розм'якшення. Фізичний стан поверхневого шару заготовки визначається співвідношенням інтенсивності і швидкості цих процесів. І аналітично описати цей динамічний процес вкрай складно. В результаті реологічного моделювання можна встановити величини залишкових напружень ($\pm\sigma_s$), глибину їх залягання і закон розподілу. Очевидно, що в межах вирішення даної задачі будуть моделюватись тільки термодформаційні залишкові напруження I роду. Інтерферентні залишкові напруження від всіх цих чинників є різноплановими і протилежними за знаками, взаємопов'язаними і приблизно одного порядку в кількісному еквіваленті. Тому можливості імітаційного реологічного моделювання – це єдиний шлях оперативного та адекватного аналізу впливу технологічних параметрів різання (структури технологічного переходу, режимів оброблення, вибору зовнішнього технологічного середовища тощо) на формування залишкових деформацій

Аналіз результатів імітаційних реологічних досліджень технологічних переходів механічного оброблення деталей з різнорідних машинобудівних матеріалів, показав, що крива залишкових термодформаційних напружень I роду є більш складною, оскільки відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (фрикційних) та стискаючих (силових) навантажень та змінну картину глибинних термічних впливів. Криві залишкових напружень I роду якісно відображають інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (температурних та фрикційних) та стискаючих (силових) навантажень. Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно 150 МПа при обробленні деталі з сплаву ХН60Ю (аналог IN 718) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,12 мм; t=0,25 мм; V=40 м/хв). Аналіз результатів імітаційного реологічного моделювання для фрезерування титанового сплаву ВТ6 (аналог ТІ6АL4V) та алюмінієвого сплаву АД33 (аналог АL 6061) дозволяє зробити

висновки про те, що середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації складатиме приблизно 32-34 МПа при обробленні деталі з титанового сплаву BT6 фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,07 мм; t=0,2 мм; V=115 м/хв) і приблизно 24 МПа при обробленні деталі з алюмінієвого сплаву АД33 фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1040D-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,1 мм; t=0,5 мм; V=800 м/хв).

5. Аналіз імітаційних реологічних досліджень механізму виникнення та формування напружень II роду, що виникають внаслідок лезового оброблення конструкційних матеріалів, дозволив зробити наступні висновки:

- значущі результати напружень II роду можуть бути отримані тільки в результаті інтенсивного лезового оброблення на швидкостях більше 100 м/хв лише для матеріалів з метастабільною структурою і, як правило, в умовах адіабатичного стружкоутворення;
- аналіз результатів реологічного моделювання технологічного переходу токарного оброблення підшипникового кільця з матеріалу ШХ15 дозволив встановити, що збільшення швидкості різання в 3 рази (з 100 м/хв до 300 м/хв) призводить до збільшення глибини залягання «білого шару» на 45% (з 4 до 5,8 мкм), а величини залишкового напруження – тільки на 28% (з 80,8 МПа до 103,4 МПа). Причому найбільш інтенсивні за величиною деформації II роду можна простежити на глибині до 6 мкм, а на глибині 10 мкм вони майже повністю зникають;
- проблемно-орієнтоване реологічне моделювання технологічних переходів є єдиним ефективним аналітичним механізмом комплексного врахування силових та термодинамічних чинників на процес фазових перетворень під час лезового оброблення деталей, що дає змогу точно і оперативно розрахувати залишкові напруження та враховувати вплив технологічних параметрів на формування цього важливого експлуатаційного показника.

6. Залишкові деформації обумовлені, в першу чергу, нерівномірним розподілом накопиченого в результаті різання напруження. Деформаційна анізотропія, та пов'язані з цим залишкові макронапруження можуть суттєво знизити міцність та корозійну стійкість виробу, особливо в тих випадках, коли він в подальшому не підлягає термічному обробленню.

В порівнянні з іншими параметрами режиму різання подача має найбільш суттєвий вплив на деформаційне зміцнення поверхневого шару. Залежності глибини і міри наклепу від подачі мають екстремальний характер, тобто існує оптимальна подача, при якій наклеп поверхневого шару має найменше значення. Реологічне моделювання технологічного переходу токарного оброблення жароміцного сплаву ХН60Ю (аналог IN 718), визначеної на основі аналізу імітаційної моделі в системі Deform 2D показав зниження характеристик наклепу на 55% у порівнянні з обробленням сталі 45 на режимах різання - подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм швидкість різання $V=120$ мм/хв. Зниженню залишкових деформацій в цьому випадку можуть сприяти підвищення міцнісних і пониження пластичних властивостей сплавів і значне зменшення коефіцієнта тертя по задній поверхні різального інструменту.

Аналіз залишкових деформацій відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних температурних, силових та фрикційних процесів, що виникають в процесі формоутворення деталі. Середньостатистичне значення залишкових деформацій в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно $\varepsilon \approx 2,5$ (мм/мм) при обробленні деталі з штампової сталі 4Х5МФ1С фрезою CoroMill 300. Аналіз результатів імітаційного реологічного моделювання доводить експотенційний характер зменшення залишкових деформацій: якщо на поверхні деталі ця величина становила $\varepsilon \approx 2,5$ (мм/мм), то на глибині 0,25 мм – вже $\varepsilon \approx 0,7$, а на глибині 1,0 мм деформація практично анігілюється і становить лише $\varepsilon \approx 0,06$ (мм/мм). Якісний та кількісний характер розподілу деформацій доводить адекватність та ефективність запропонованих методик для формування аналітичної бази при побудові функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

РОЗДІЛ 5.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Головною особливістю функціонально-орієнтованого проектування є те, що первинним у формуванні структури та параметрів технологічних операцій і переходів є забезпечення комплексу функціонально-експлуатаційних властивостей виробу при дотриманні заданих параметрів точності, нормативного ресурсу його роботи а також організаційних та техніко-економічних обмежень. У цьому випадку функцією мети при прийнятті рішень про оптимальну структуру та параметри технологічного процесу є інтегральний кваліметричний показник, який системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо найбільш навантажених поверхонь виробу, які є наслідками формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій. Вхідні дані для формування обмежень та критеріїв оптимізаційної задачі, що має на меті реалізацію функціонально-орієнтованого принципу проектування (або корекції) структури та параметрів технологічного процесу, реалізуються на 2-х етапах. На першому етапі в САЕ-системі відбувається імітаційне моделювання умов експлуатації вузла та окремих його деталей. На другому етапі ці імітаційні моделі набувають аналітичної інтерпретації та формалізації, достатньої для використання у оптимізаційній моделі.

5.1. Математичне моделювання основних експлуатаційних властивостей (реакцій) функціональних поверхонь трибомеханічних систем з врахуванням технологічних чинників

При виборі структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу, операції та переходу, заданих умовами експлуатації, точності виготовлення деталей машин і якості їх робочих поверхонь, потрібно мати на увазі, що якість обробленої поверхні і точність деталей машин в

основному характеризуються: геометричними параметрами (макро- та мікрогеометрією, напрямом штрихів оброблення, точністю взаємного розташування поверхонь тощо); фізико-механічними властивостями поверхневого шару (залишковими напруженнями та деформаціями) і фізико-хімічними властивостями поверхневого шару. Співставивши результати наукових досліджень проф. А.Г.Сулова та проф. Ю.Г.Шнайдера [293, 321] з результатами проведених реологічних та експериментальних досліджень в табл.5.1 наведений якісний зв'язок різних експлуатаційних властивостей поверхонь з комплексом параметрів його мікротопології [281]. В даній таблиці прийняті наступні позначення:

– знак «+» у відповідній графі таблиці означає, що збільшення вхідного параметру сприяє зростанню (покращанню властивостей) вихідного параметра, а знак «++» наголошує на домінуючому впливі даного вхідного параметра у збільшенні (підвищенні рівня відповідної експлуатаційної характеристики) вихідного параметра;

– знак «-» у відповідній графі таблиці означає, що збільшення вхідного параметру сприяє зменшенню (погіршенню функціональних властивостей) вихідного параметра, а знак «--» наголошує на домінуючому впливі даного вхідного параметра у зменшенні номінального значення або погіршенні експлуатаційної характеристики вихідного параметра, відповідно.

У діючому в Україні на сьогоднішній день стандарті ГОСТ 2789-73 «Шероховатість поверхності. Параметри і характеристики» регламентуються лише 6 параметрів для контролю шорсткості, їх можна розділити на висотні (R_a , R_z , P_{max}), крокові (S_m , S) і змішані (t_p). За допомогою поєднання цих параметрів можна лише з незначною достовірністю аналізувати їх вплив на деякі функціональні параметри виробу. Якщо взяти до уваги стандарт ISO 4287-1997 [19], то там вказані 76 параметрів, більшість з яких дозволяє з досить високою ефективністю контролювати ту чи іншу функціональну характеристику деталі. Наприклад, параметр R_{pk} (середнє арифметичне значення висот вершин, розташованих вище обраного рівня перетинів профілю)

дозволяє визначити величину зношування матеріалу в процесі припрацювання, параметр R_k (глибина усіченого профілю) найбільш істотно впливає на термін служби деталі (допустиме зношування найбільш відповідальної функціональної поверхні), а параметр R_{vk} (середнє арифметичне значення глибин впадин, розташованих нижче вибраного рівня перетинів профілю) відображає здатність поверхні до утримання мастила [104, 105, 281, 287].

Як зазначалось у розділі 4, мікропрофіль обробленої поверхні, що визначає значення її шорсткості, утворюється в результаті векторного додавання трьох складових: висоти мікронерівностей, як результат копіювання різальної частини інструмента з урахуванням кінематичних характеристик формоутворюючого руху (Δ_1), висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) та складової мікронерівності, що формується внаслідок пластичного деформування матеріалу заготовки в зоні силового впливу різального клина (Δ_3) [70, 276, 284]. З геометричної точки зору величина, форма і взаємне розташування нерівностей (напрям інструментальних рисок) визначаються формою і станом різальних лез і тими елементами режиму різання, які впливають на зміну траєкторії руху цих лез о оброблюваної поверхні. У різних умовах обробки пластичні і пружні деформації оброблюваного матеріалу і вібрація спотворюють геометрично правильну форму нерівностей, порушують їх закономірний розподіл на поверхні і в значній мірі збільшують їх висоту. У ряді випадків пластичні деформації і вібрації викликають появу поздовжньої шорсткості, що досягає значних розмірів, і збільшення поперечної шорсткості. Переважний вплив на формування шорсткості поверхні надає (як правило) одна з трьох зазначених складових, яка і визначає характер і величину шорсткості. Проте, в окремих випадках мікронерівність профілю формується в результаті одночасного і майже рівнозначного впливу всіх зазначених чинників і внаслідок цього не має чітко визначених аналітичних формалізацій.

Табл. 5.1. Якісний зв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь з комплексом параметрів їх мікротопології та фізико-механічного стану, що забезпечуються режимами механічного оброблення та геометричними параметрами лезового інструмента [281]

		Похідні параметри (характеристики якості та топології поверхневого шару)														
Вхідні параметри (режими лезового оброблення та геометричні характеристики леза)	$s \leq 0,08$	+	++	++	0	+	+	0	0	0	++	++	+	+	+	
	$s > 0,08$	++	++	+	+	++	++	+	++	+	+	++	++	++	++	
	$V \leq 50$	-	0	--	--	0	-	0	-	--	-	-	--	--	--	
	$V > 50$	-	0	-	-	0	0	0	-	-	-	--	--	--	--	
	t	++	++	++	+	0	0	+	+	0	+	0	++	++	++	
	φ	+	++	0	+	0	0	++	++	0	+	+	-	-	-	
	φ_1	0	++	0	+	0	0	++	+	0	+	+	-	-	-	
	$\gamma \leq 0$	++	+	++	++	0	-	+	+	0	0	0	-	-	-	
	$\gamma > 0$	++	+	+	++	0	++	0	+	0	0	0	++	++	++	
	$\alpha \leq 5$	+	+	++	++	0	0	0	-	0	0	0	++	++	++	
	$\alpha > 5$	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0	+	-	-	-
	r	+	+	0	+	0	-	0	-	+	+	++	++	++	++	
Вихідні параметри (основні експлуатаційні характеристики поверхонь)		R_{max}	Ra			S_m	S	β	R_p	R_v	F	r^2	$\sigma_{зал}$		h_3	
			Δ_1	Δ_2	Δ_3								>0	<0		
<i>Зносостійкість</i>		--	--	-	0	--	--	-	--	0	++	++	++	--	++	
<i>Коефіцієнт тертя</i>		++	++	++	0	+	+	++	+	0	+	--	0	0	0	
<i>Втомна міцність</i>		--	--	--	--	-	--	--	-	--	++	+	++	--	--	
<i>Корозійна стійкість</i>		--	--	--	0	0	0	0	-	-	-	0	--	--	--	

<i>Масильна утримуюча здатність</i>	++	++	+	++	++	++	++	-	++	+	--	0	0	0
<i>Пиловидаленість</i>	-	--	--	--	--	-	++	--	--	-	++	0	0	0
<i>Властивість відображення променів</i>	--	--	--	--	--	--	-	--	--	-	++	0	0	0
<i>Тепловідбиття</i>	--	--	--	--	--	--	-	--	--	-	++	0	0	0
<i>Властивість забезпечення герметичності з'єднання</i>	--	--	--	--	--	--	0	--	0	0	+	0	0	0
<i>Властивість поглинання теплової енергії</i>	++	+	+	+	0	0	0	0	+	+	--	0	0	0

Позначення. R_{max} – найбільша висота мікронерівностей профілю, мкм; Ra – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм; Δ_1 – геометрико-кінематична складова мікронерівності профілю, мкм; Δ_2 – вібраційна складова мікронерівності профілю, мкм; Δ_3 – деформаційна складова мікронерівності профілю, мкм; S_m - середній крок мікронерівностей по вершинах, мкм; S – середній крок місцевих виступів профілю, мкм; β - кут нахилу бічної сторони нерівностей; R_p - усереднена висота виступів профілю, мкм; R_v - усереднена глибина западин профілю, мкм; F – сумарна площа опорної поверхні, мкм²; r^2 – радіус заокруглення вершин виступів; $\sigma_{зал}$ – залишкові напруження ($\sigma_{зал} > 0$ - розтягувальні; $\sigma_{зал} < 0$ – стискаючі); h_3 – величина залишкових деформацій, мкм.

Традиційно контрольовані параметри шорсткості поверхні R_a і R_z не дають повної оцінки експлуатаційних властивостей, оскільки не відображають форму мікрорельєфу, що є надзвичайно важливим для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей функціональних поверхонь деталей машин. Очевидно, що для повної оцінки впливу мікрогеометрії поверхневого шару та фізико-механічних властивостей функціональних поверхонь виробу на їх експлуатаційні характеристики важливою є також непараметрична оцінка профілю [281, 293]. Найбільш повно ця оцінка формалізується опорної лінією. У цьому зв'язку заслуговує на увагу досвід західноєвропейських держав, зокрема Німеччини, де контролюються не тільки параметри мікрогеометрії поверхні, але і форма профілю з використанням опорної лінії [103, 281].

Опорна лінія профілю змінюється від рівня найбільшого піку профілю ($t_p = 0$) до рівня найбільшої впадини ($t_p = 100\%$). По ній можна отримати параметри, що характеризують форму мікрогеометрії поверхні:

- R_{pk} - усереднена висота виступів. Це верхня частина профілю поверхні, яка, в першу чергу руйнується в процесі припрацювання виробу.
- R_k - глибина нерівностей профілю поверхні, що визначає основу профілю. На цьому рівні поверхня тривалий час знаходиться в роботі. Даний параметр має вирішальний вплив на термін служби і якісні показники роботи виробу.
- R_{vk} - усереднена глибина западин профілю, що визначають мастилоутримуючу властивість функціональної поверхні.

Таким чином, криві опорних поверхонь мають значення для розрахунків контактних напружень та деформацій, характеризують потенційні трибомеханічні та мастилоутримуючі властивості з'єднання. Причому, при моделюванні трибоконтакту шорстких поверхонь приймають до уваги тільки найбільші виступи, що складають верхню частину опорної кривої. На Рис.5.1 представлені приклад профілограми і опорної лінії профілю з відповідними характеристиками для зносостійких поверхонь [281].

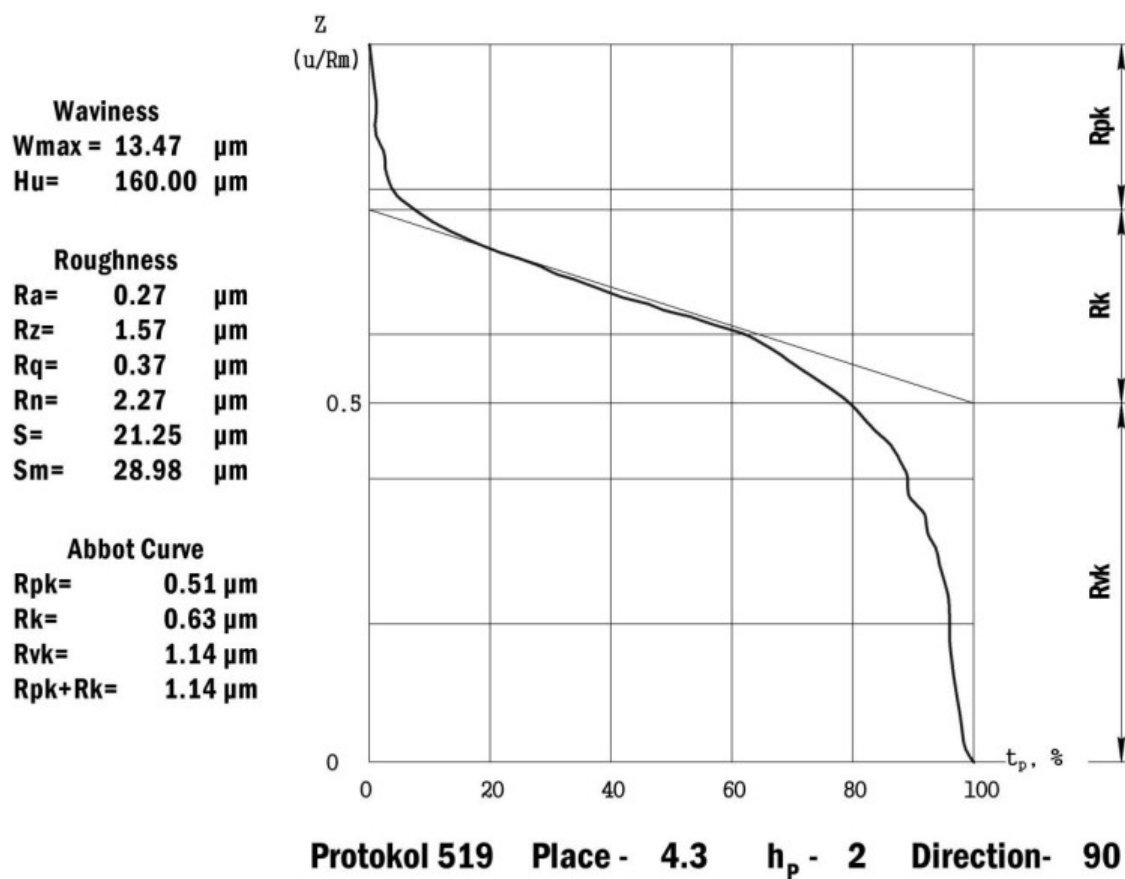
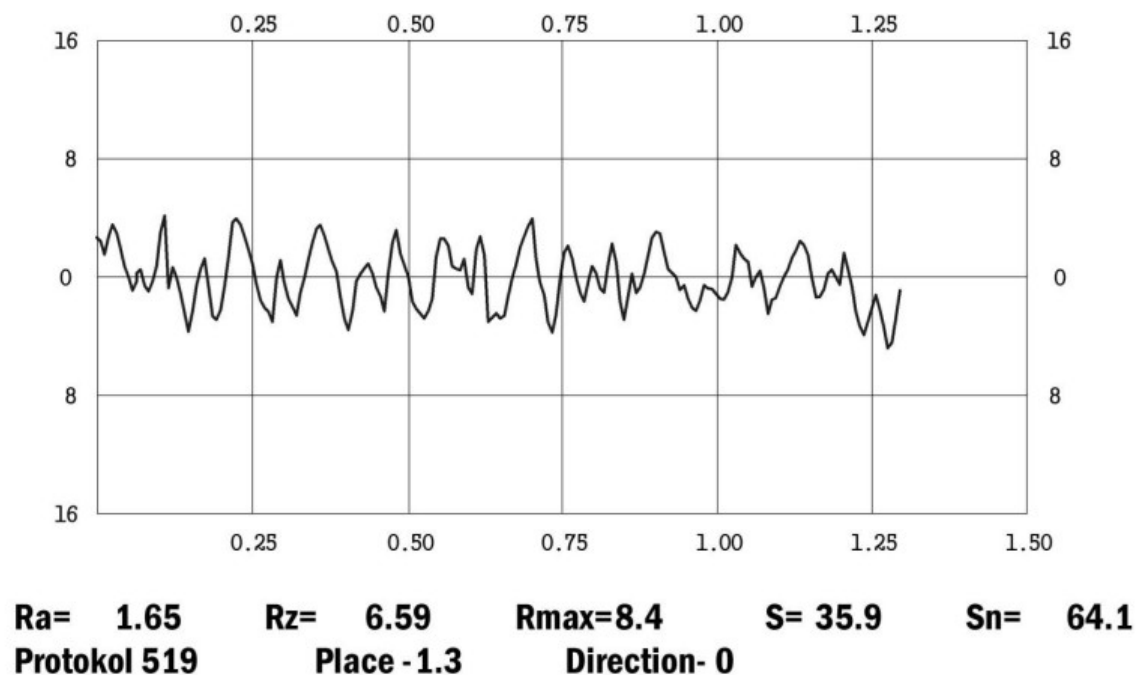


Рис.5.1. Приклад профілограми і опорної лінії профілю функціональної поверхні привідного валу пневмонасосу [281].

5.1.1. Математична модель зносостійкості функціональних поверхонь виробу з врахуванням технологічних чинників

Серед методів підвищення зносостійкості поверхонь рухомих спряжень деталей машин особливе місце займає процес управління цією експлуатаційною властивістю вже на стадії технологічної підготовки виробництва. Можливість прогнозувати певну величину зносостійкості при заданні характеристик якості поверхневого шару, що забезпечуються оптимальними методами оброблення, дозволяє підвищити експлуатаційні властивості виробу у відповідності до концепції PLM. Проте вирішення цієї проблеми багато в чому ускладнене з наступних причин: складність адекватної формалізації математичних моделей, що пов'язують показники зносостійкості з характеристиками якості поверхні і технологічними умовами оброблення, різноплановість підходів до опису фізики процесів зношування, розрізненість і суперечність відомостей по забезпеченню зносостійкості, багатоваріантність при виборі рішень, використання різних критеріїв при виборі умов зношування, матеріалів, характеристик якості поверхні, методів оброблення та ін. Враховуючи це, першочерговим завданням в умовах конструкторсько-технологічного забезпечення зносостійкості деталей повинна стати систематизація даних (інформації) про математичну модель процесу зношування і побудова на її основі сучасного методу проектування структури та параметрів функціонально-орієнтованих технологічних процесів з використанням обчислювальної техніки.

Знаючи вплив технологічних факторів на якість поверхні, можна призначати умови обробки, що забезпечують досягнення заданих параметрів довговічності деталей машин в процесі їх експлуатації [283]. Істотний вплив має мікрогеометричні параметри на умови сухого або граничного тертя між спряженими поверхнями. Сухе тертя виникає через те, що при малих зазорах при малій шорсткості мастило видавлюється із зони контакту. У результаті в зонах безпосереднього контакту поверхонь утворюються міцні металеві зв'язки, тобто відбувається їх прихоплювання, що, у свою чергу, також обумовлює інтенсивне зношування деталей. Феноменологічна модель тертя розглядає його

як процес дисипації енергії, що протікає при відносному тангенціальному переміщенні спряжених поверхонь, що здійснюється в зонах реального контакту, створеного під дією зовнішніх навантажень та в середовищі реальних умов взаємодії спряжених поверхонь виробів [126, 283]. При зближенні шорстких поверхонь під навантаженням спочатку дотикаються найбільш високі нерівності, що підлягають дії значних локальних тисків, що призводить до значного стиску нерівностей і введенням в контактну взаємодію нових мікровиступів. Це відбувається до тих пір, поки загальна площа контакту не забезпечить несучу здатність поверхні у відповідності до її розмірів, прикладеного зовні навантаження, умов контакту та фізико-механічних властивостей матеріалів спряжених деталей. Як показують дослідження [126, 209, 283, 293], сформований таким чином фактичний контакт майже на 2 порядку менше номінального. Причому, фактична площа контакту (ФПК) має суттєвий вплив на такі важливі кваліметричні властивості, як теплопровідність, електричний опір реальних спряжень, контактна міцність та корозійна стійкість тощо (див. табл.5.1).

Для спрощення розрахунку площі фактичного контакту, найбільш ефективним є пропозиція Дьомкіна про шорстку еквівалентну поверхню, що акумулює в собі шорсткість обох спряжених поверхонь і дозволяє обмежитись розглядом контакту такої еквівалентної поверхні і ідеально-гладкої [126]. Цей підхід базується на ступеневій апроксимації площі опорної поверхні η відносно опорної кривої (Рис.5.1) з використанням апроксимуючих коефіцієнтів b і ν_D , що описується формулою [126]:

$$\eta = b \cdot \varepsilon^{\nu_D} \quad (5.1)$$

Параметри b і ν_D пов'язані з параметрами мікронерівностей відношеннями :

$$b = t_m \left(\frac{R_{\max}}{R_p} \right)^{\nu_D}, \quad (5.2)$$

$$\nu_D = 2t_m \frac{R_p}{Ra} - 1, \quad (5.3)$$

де t_m – відносна опорна довжина на рівні середньої лінії.

Для шорсткої еквівалентної поверхні сформульовані такі співвідношення:

$$b = k \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot (R_{\max 1} + R_{\max 2}) \frac{\nu_{D1} + \nu_{D2}}{R_{\max 1}^{\nu_{D1}} \cdot R_{\max 2}^{\nu_{D2}}}, \quad (5.4)$$

$$\nu_D = \nu_{D1} + \nu_{D2} \quad (5.5)$$

$$\text{де } k = \frac{\Gamma(\nu_{D1} + 1) \cdot \Gamma(\nu_{D2} + 1)}{\Gamma(\nu_{D1} + \nu_{D2} + 1)};$$

$\Gamma(\cdot)$ – гама-функція.

Таким чином, ми можемо апроксимувати контурну площу спряжених поверхонь до вигляду контакту шорсткої поверхні з віртуальними показниками b і ν_D і умовним радіусом закруглення мікрогеометричної поверхні r^2 з абсолютно гладкою поверхнею. Очевидно, що кожен мікровиступ деформується спочатку пружно, а потім пружно-пластично. При цьому вважається, що мікровиступ деформується абсолютно пружно за умови:

$$\frac{R_{\max}}{r^2} < K_m \frac{\sigma_T (1 - \mu^2)}{E} \quad (5.6)$$

де r - радіус плями контакту;

σ_T - межа текучості матеріалу.

K_m - коефіцієнт, що залежить від умов деформування [126] $K_m = 6 \dots 8$;

μ - коефіцієнт Пуассона;

E - модуль Юнга.

Іншим критерієм переходу від пружного контакту до пластичного служить критерій Вільямсона-Грінвуда [209], або т.зв. індекс пластичності. При цьому вважається, що пластична текучість мікронерівності починається тоді, коли максимальний Герців тиск q_{\max} досягає значення $0,6H$ (H – твердість найбільш м'якого з контактуючих матеріалів). Приймаючи до уваги апроксимаційну модель сферичної форми мікронерівності, при втисканні кулі в площину, зближення y пов'язане з тиском співвідношенням:

$$y = \frac{\pi^2}{4} \frac{q_{\max}^2 \mu}{E^2} \quad (5.7)$$

Підставляючи $q_{max} = 0,6H$, отримуємо критичне зближення:

$$[y] = 0,89 \cdot \mu \cdot \left(\frac{H}{E}\right)^2 \quad (5.8)$$

Для розрахунку контактних деформацій необхідно класифікувати спряжені поверхні за геометричною формою у відповідності до форми змодельованих мікронерівностей, отриманих як векторна сума геометрико-кінематичної, вібраційної та деформаційної складової (Розділ 4). Для них розроблені типові моделі рішення контактних задач пружності і пластичності. Так, моделювання взаємодії сферичної поверхні і пластичного площинного півпростору, вирішуємо за алгоритмом А.Ю. Ішлінського [150], моделюючи взаємодію плоского клина, розглядаємо задачу К.Хілла [27]; при циліндричній і плоскій поверхні, використовуємо аналітичні залежності, сформульовані в задачі Прандтля [235] тощо.

Так, при пружному контакті сферичних виступів за формулою Герца можна розрахувати питомий контактний тиск за формулою [126, 209, 253]:

$$q_r = 0,43 \sqrt{\frac{y}{I^2 \cdot J}} \quad (5.9)$$

де:

$$I = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}; \quad J = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.10)$$

R_1, R_2 - радіуси спряжених поверхонь;

y – умовне зближення спряжених поверхонь.

У випадку пластичної деформації для визначення контактного тиску використовується формула Майєра:

$$N_i = g d^g, \quad (5.11)$$

де N_i - навантаження на індентор;

d - діаметр відбитку;

g, \mathcal{G} - коефіцієнти, що характеризують пластичну властивість матеріалу.

Так, для спряження циліндричних поверхонь, отримуємо формулу [253]:

$$N_i = (8Rpr)^{g/2} g \varepsilon^{g/2}, \quad (5.12)$$

Тоді контактний тиск визначається за формулою:

$$q_r = \left(\frac{2H_M^{1/m_1} R p}{\alpha r} \cdot \varepsilon \right)^{m_1}, \quad (5.13)$$

де $m_1 = g/2 - 1$;

H_M – твердість по Майєру, що отримується при умові $d = D$, тобто при втисканні сфери до екватора:

$$g = \frac{\pi H_M}{4D^{g-2}}, \quad (5.14)$$

Отже, підтверджується формула Герца [126]:

$$q_r = B(\varepsilon)^\omega, \quad (5.15)$$

де B і ω - коефіцієнти, що залежать від форми мікронерівностей і фізико-механічних властивостей матеріалу.

Загальна формула зближення спряжених шорстких поверхонь при класичному пружно-пластичному контакті визначатиметься за формулою [126, 209, 253]:

$$y = \frac{N}{2\pi r C \sigma_T} + \frac{3}{8} I \sqrt{N \pi C \sigma_T} \quad (5.16)$$

В даній формулі перша частина визначає пластичну складову зближення, а друга – пружну.

Згідно з формулою (5.11), граничне пружне навантаження, що сприймається одиночним мікровиступом, можна подати у вигляді:

$$N_i = q_r \Delta A_{r_i} = B(\varepsilon_i)^\omega \Delta A_{r_i}, \quad (5.17)$$

де відносне зближення поверхонь $\varepsilon = \frac{y_i}{R_{pk}}$;

ΔA_{r_i} - дійсна площа плями контакту у випадку даного зближення.

Враховуючи те, що середньостатистична висота виступу відрізняється від максимального значення Rpk_{max} , повне навантаження визначаємо сумуванням навантажень окремих виступів і з врахуванням, що $dN_i = N_i dn_r$. Провівши

інтегрування за всіма виступами, що вступили в контакт та з урахуванням умов еквівалентності (5.4) та (5.5) отримаємо [126]:

$$N = \frac{\Gamma(2 + \omega)\Gamma(\nu + 1)}{\Gamma(\nu + \omega + 1)} \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot \varepsilon^{\omega + \nu}, \quad (5.18)$$

або враховуючи константу $K_3 = \frac{\Gamma(2 + \omega)\Gamma(\nu + 1)}{\Gamma(\nu + \omega + 1)}$, можна зробити перетворення:

$$N = K_3 \cdot \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot \varepsilon^{\omega + \nu}, \quad (5.19)$$

Значення коефіцієнта K_3 наведені в технічній літературі [126, 253, 209].

Тоді формула відносного зближення набуде вигляду:

$$\varepsilon = \left(\frac{q_r}{\alpha \cdot K_3 \cdot t_m \cdot B} \right)^{1/(\omega + \nu)} \quad (5.20)$$

Відносна площа контакту :

$$\eta = \alpha^{\frac{\omega}{(\nu + \omega)}} \cdot t_m^{\frac{\omega}{(\nu + \omega)}} \cdot q_r^{\frac{\nu}{(\nu + \omega)}} \cdot K_3^{\frac{(\nu + \omega)}{\nu}} \cdot B^{\frac{(\nu + \omega)}{\nu}} \quad (5.21)$$

де α - коефіцієнт пружності мікровиступів (можна умовно прийняти $\alpha=0,5$ у випадку пружного контакту за умови забезпечення критерію Вільямсона-Грінвуда; або $\alpha=1,0$ у випадку пластичного контакту за умови перевищення індексом пластичності величини $0,6H$) [126, 253, 209];

t_m – відносна опорна довжина по середній лінії профілограми мікронерівностей профілю;

ν - параметр кривої Аббота;

B, ω - емпіричні коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу [126, 253, 209].

Таким чином, при моделюванні трибоконтракту з урахуванням параметрів мікротопології поверхонь формули (5.1)-(5.3) повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні у відповідності до моделі Дьомкіна [126]:

$$\nu_{ekv} = \nu_1 + \nu_2; \quad (5.22)$$

$$tm_{ekv} = K_p \cdot tm_1 \cdot tm_2; \quad (5.23)$$

$$Rpk_{ekv} = K_p \cdot Rpk_1 \cdot Rpk_2; \quad (5.24)$$

$$K_p = \frac{(Rpk_1 + Rpk_2)^{V_{ekv}}}{Rpk_1^{V_1} Rpk_2^{V_2}}; \quad (5.25)$$

$$b_{ekv} = \frac{(Rmax_1 + Rmax_2)^{V_{ekv}}}{Rmax_1^{V_1} Rmax_2^{V_2}}; \quad (5.26)$$

$$Rvk_{ekv} = K_v \cdot Rvk_1 \cdot Rvk_2; \quad (5.27)$$

$$K_v = \frac{(Rvk_1 + Rvk_2)^{V_{ekv}}}{Rvk_1^{V_1} Rvk_2^{V_2}}; \quad (5.28)$$

$$Rk_{ekv} = Rk_1 + Rk_2; \quad (5.29)$$

Середня несуча площа контакту залежить від навантаження на трибоконтат в ступені, що змінюється від 1 до 0,2, причому домінуючий вплив має саме форма мікронерівностей, а не їх висотні та крокові параметри.

Крім того, відомо [205], що контактна взаємодія визначається тільки формою зазору між контактуючими тілами (їх зсувна взаємодія до уваги не береться, зважаючи на незначний інтегральний вплив). Тоді, без обмеження адекватності, можна вважати шорсткою межу тільки одного з контактуючих поверхонь, якщо при цьому забезпечити відповідність профілю шорсткості проміжку між недеформованими поверхнями, тобто використати профіль еквівалентної мікронерівності і приведенний модуль пружності :

$$E_{ekv} = \frac{1}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1}\right) + \left(\frac{1 - \mu_2^2}{E_2}\right)}, \quad (5.30)$$

де E_1 і E_2 — модулі пружності матеріалів спряжених контртіл;

μ_1 і μ_2 — коефіцієнти Пуассона контактуючих тіл.

Інтенсивність лінійного зношування визначається за формулою:

$$I_h = \frac{y}{L}, \quad (5.31)$$

де y — величина зношеного шару (абсолютне зближення спряжених поверхонь – формула (5.16));

L - шлях тертя, на якому відбувається зношування.

Основна формула для розрахунку інтенсивності зношування має вигляд:

$$I_h = i \frac{A_r}{A_a} = i \frac{P_a}{P_r} \quad (5.32)$$

де A_a , A_r – номінальна та фактична площа трибоконтракту спряжених поверхонь, відповідно;

де P_a , P_r – номінальне та фактичне навантаження спряжених поверхонь, відповідно;

i – питоме зношування, що являє собою кількість матеріалу, що видаляється з фактичної площі дотику на довжину d :

$$i = \frac{y}{d(\nu + 1)n} \quad (5.33)$$

З аналізу формул (5.32) - (5.33) очевидно, що інтенсивність зношування визначається числом циклів, що призводять до відділення частки матеріалу, і відношенням номінального тиску до фактичного. Число циклів залежить від контактних напружень і деформацій, які пов'язані з тертям. Розрахунок зношування зводиться до аналітичного виразу цих величин через механічні характеристики спряжених поверхонь і зовнішні параметри процесу (навантаження, температура, швидкість, що можна змоделювати в САЕ системі) [286].

У випадку пружного контакту в зоні спряжених поверхонь кількість циклів n до руйнування визначається за формулою [171, 172, 304]:

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{k \cdot f \cdot P_r} \right)^t \quad (5.34)$$

де σ_0 – початкове екстрапольоване значення напружень при $n=1$;

де f – коефіцієнт тертя ковзання;

k – коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу. Так, для крихких матеріалів ($t_x \geq 2$) приймаємо $k = 5$; для умовно-крихких ($1 \leq t_x < 2$) приймаємо $k = 4$; для пластичних матеріалів ($t_x < 1$) приймаємо $k = 3$. Проте, для матеріалів, що допускають виникнення значних пластичних

матеріалів, але працюючих в пружній області і лише для випадку виконання умови Вільямсона-Грінвуда (формула (5.6)):

$$k = 1,5 \sqrt{4 \cdot (1 - \mu - \mu^2) + \frac{(1 - 2\mu)^2}{f^2}} \quad (5.35)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона.

Тоді при пружному контакті інтенсивність зношування визначається за формулою [161, 162]:

$$I_h = \frac{c_1 \cdot P_a^{1+\gamma}}{\chi} (\Gamma)^{f-\gamma t-1} \left(\frac{kf}{\sigma_0 c_2} \right)^t \cdot \lambda \cdot \Delta^{\gamma t} \quad (5.36)$$

де приведений еквівалентний показник ступеня γ визначається як:

$$\gamma = \frac{1}{2\nu_{ekv} + 1}, \quad (5.37)$$

а константи c_1, c_2 :

$$c_1 = \frac{3\pi \sqrt{\nu_{ekv}}}{8k(\nu_{ekv} + 1)}; \quad c_2 = 0,5 \cdot \left(\frac{3\pi}{2k} \right)^{2\nu_{ekv}\gamma} \quad (5.38)$$

Δ_{ekv} - безрозмірний комплекс, що характеризує еквівалентну шорсткість поверхні:

$$\Delta_{ekv} = \frac{R \max_{ekv} \cdot b_{ekv}^{\nu_{ekv}}}{r} \quad (5.39)$$

ν_{ekv} - параметр ступеневої апроксимації кривої Аббота;

b_{ekv} – безрозмірний параметр кривої опорної еквівалентної поверхні (за формулою (5.26));

λ - коефіцієнт, що враховує вплив поверхневих залишкових напружень II-го роду на інтенсивність зношування, визначається за формулою [Суслов]:

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_a - \sigma_a^{II}}{\sigma_a} \right)^{t_y} \quad (5.40)$$

де σ_a^{II} - залишкове напруження II-го роду, що визначаються на основі аналізу реологічної моделі алотропних перетворень (див. розд.4.);

σ_a - дійсне значення еквівалентного напруження на поверхні тертя, що визначаються на основі аналізу CAE – моделі;

t_y - коефіцієнт фрикційної втоми при пружному контакті спряжених поверхонь [323].

У спрощеному вигляді формула (5.36) може бути записана:

$$I_h = \frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda}{\sqrt{v_{ekv}} (v_{ekv}^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \quad (5.41)$$

При досить гладких металевих поверхнях ($Ra=0,1 \dots 0,5$ мкм, для яких $v_{ekv} = 3$ і $\mu = 0,3$, $K_2 = 0,12$ [109]), справедливе спрощення формули (5.41):

$$I_h = \frac{0,6P_a \cdot \lambda}{E_{ekv} \cdot n} \quad (5.42)$$

Формула (5.42) може бути рекомендована для приблизного розрахунку на зношування. Число циклів слід вибрати по кривій Веллера [109], враховуючи, що розтягувальне напруження σ_p приблизно дорівнює $5fPr$.

Як впливає з формули (5.36), інтенсивність зношування в умовах пружного контакту прямо пропорційна номінальному тиску P_a і обернено пропорційна до числа циклів n і еквівалентному модулю пружності E_{ekv} .

Можна зробити висновок, що в умовах пружного контакту інтенсивність зношування залежить від топології мікрогеометричних характеристик спряжених поверхонь (b , v , $Rmax$, tm), механічних властивостей матеріалів (σ_0 , E , μ), коефіцієнта тертя f , втомної характеристики t і тисків - номінального P_a і контурного P_c .

У більш складному випадку пластичного контакту шорстких поверхонь (коли умова Вільямсона-Грінвуда (5.8) не виконується, тобто індекс пластичності перевищує значення $0,6H$) та з врахуванням теорії еквівалентної поверхні (модель Демкина (формули (5.22)-(5.29))), об'єм зношеного (в даному випадку текучого) матеріалу V_b , визначаємо за формулою І.В. Крагельського [171, 172, 304]:

$$V_b = A_c \cdot R \max_{ekv} b_{ekv} \int_0^\varepsilon x^{v_{ekv}} dx = \frac{A_c \cdot R \max_{ekv} b_{ekv} \cdot \varepsilon^{v_{ekv}+1}}{v_{ekv} + 1} = \frac{\varepsilon \cdot A_r \cdot R \max_{ekv}}{v_{ekv} + 1}, \quad (5.43)$$

де x – відстань від середньої лінії мікронерівностей до лінії виступів, виражене у відносних одиницях:

$$x = \frac{p}{R_{\max_{ekv}}} \quad (5.44)$$

ε - відносне зближення спряжених поверхонь, що визначається за формулою (5.20) але з врахуванням еквівалентності показників – відносної опорної довжини по середній лінії профілографи мікронерівностей профілю tm_{ekv} та параметра ступеневої апроксимації кривої Аббота v_{ekv} .

Таким чином, у випадку пластичного контакту мікронерівностей спряжених поверхонь інтенсивність зношування можна описати формулою:

$$I_h = \frac{\alpha \cdot b_{ekv} \cdot \varepsilon^{(v_{ekv}+1)} \cdot R \max_{ekv} \cdot \lambda}{(v_{ekv} + 1) \cdot n \cdot d} \quad (5.45)$$

Аналізуючи формули (5.36) і (5.45), можна зробити висновок, що на інтенсивність зношування суттєвий вплив мають такі чинники, як зовнішні умови тертя, механічні властивості матеріалів та мікротопологія спряжених поверхонь та їх фрикційні характеристики. Причому саме структура та параметри технологічного процесу механічного та хіміко-термічного оброблення та зміцнення функціональних поверхонь визначатимуть більшість з цих параметрів [281]. Проте, у вищенаведених моделях відсутні такі важливі характеристики, як швидкість ковзання і пов'язана з нею температура трибоспряження, що можуть створити значущий вплив на закономірності зношування [253]. Таким чином, слід враховувати комплексну дію механічних та термодинамічних чинників у імітаційних САЕ моделях роботи машин і механізмів.

Зношування і температура в трибоспряженнях в залежності від вихідних параметрів мікротопології поверхонь змінюються симбатно. Тобто, при прямій залежності коефіцієнта тертя до зношування при пружно-пластичному контакті можна визначити мінімум на кривій температура-шорсткість. У відповідності

до термофлуктаційної теорії С.М.Журкова [171, 172, 304], зносостійкість матеріалу повинна бути обернено пропорційна температурі у фрикційному контакті. В умовах сталого навантаження і швидкості ковзання найменша температура в зоні трибоконтакту буде відповідати мінімальному значенню коефіцієнта тертя. Якщо вважати режим тертя усталеним, а отже термофізичні властивості матеріалів спряжених деталей постійними, то отримаємо середню температуру в контакті:

$$\tau_{\min} = \frac{f_{\min} \cdot p \cdot V}{(\lambda_1 \cdot K_1 + \lambda_2 \cdot K_2) \cdot A_a}, \quad (5.46)$$

де λ_1, λ_2 – коефіцієнти теплопровідності спряжених поверхонь, відповідно;

K_1, K_2 – емпіричні коефіцієнти теплофізичних та геометричних властивостей матеріалів спряжених поверхонь, відповідно [171, 172, 304];

A_a – номінальна площа трибоконтакту.

Отже, мінімальному значенню температури і буде відповідати мінімальне зношування.

Таким чином, явища тертя і зношування металів обумовлені різними процесами, що протікають на спряжених поверхнях виробів (окислення, утворення металевих зв'язків, мікрорізання, втомних руйнувань та ін.) Доведено [283], що в умовах конкретної експлуатаційної ситуації практично завжди можна виділити домінуючий вид тертя, що призводить до зношування функціональної поверхні з найбільшою інтенсивністю (I_h). Цей процес витісняє інші і стає переважальним. Ця умова є необхідною, але недостатньою. Для стійкого існування провідного виду зношування повинна бути дотримана додаткова умова, що витікає з аналізу кінетики руйнування спряжених поверхонь: при сталому зношуванні інтенсивність руйнування спряжених поверхонь не повинна перевищувати швидкості процесу, що визначає вид зношування [166, 171, 172, 304], тобто:

$$I_{\text{руйн}} \leq I_h \quad (5.47)$$

Перше положення теорії зношування знаходяться у відповідності з експериментально доведеним [166, 171, 172, 304] фактом існування домінуючого і супутніх видів зношування і може бути записано у вигляді:

$$\exists I_{hj} \rightarrow \forall (I_{h_схолл}; I_{h_тепл}; I_{h_абр}; I_{h_втомн}) \leq [I_{руйн}] \quad (5.48)$$

де $I_{h_схолл}; I_{h_тепл}; I_{h_абр}; I_{h_втомн}$ - інтенсивність зношування за видами (схоплювання 1-го і 2-го роду, абразивне, втомне, відповідно)

5.1.2. Математична модель втомної міцності з врахуванням конструкторсько-технологічних чинників

Мікронерівності, які є результатом механічного оброблення поверхні, є джерелами концентрації напружень, що істотно впливають на показники втомної міцності. В результаті оброблення різанням на поверхні деталі утворюється зона залишкової деформації і виникають залишкові напруження. Наклеп поверхні і залишкові напруження стиску підвищують втомний опір, а залишкові розтягувальні напруження, навпаки, істотно знижують межу витривалості виробу. Особливе значення має величина залишкових напружень II роду, що виникає внаслідок структурно-фазових перетворень, математична модель виникнення та формалізованої оцінки яких наведена в розд.4. Крім того, із зростанням шорсткості оброблення поверхні також відбувається зниження меж витривалості. Причому ця тенденція тим сильніше проявляється, чим вища межа міцності оброблюваного матеріалу та вищий ступінь структурно-фазової неоднорідності матеріалу заготовки. Зниження межі витривалості оцінюють коефіцієнтами впливу якості оброблення поверхні на величину меж витривалості - σ_{-1} , τ_{-1} при згині і крученні, відповідно.

Загальний коефіцієнт впливу механічних та конструкторсько-технологічних чинників на втомну міцність деталі $n_{\sigma\Sigma}$ визначають за формулою [264]:

$$n_{\sigma\Sigma} = \left(\frac{n_{\sigma K}}{n_{\sigma D}} + \frac{1}{n_{\sigma R}} - 1 \right) \cdot \frac{n_{\sigma Z}}{n_{\sigma V}} \quad (5.49)$$

де n_{eK} - ефективний коефіцієнт концентрації напружень;

n_{eD} - коефіцієнт впливу геометричних розмірів деталі;

n_{eR} - коефіцієнт впливу шорсткості поверхні;

n_{eV} - коефіцієнт впливу поверхневого зміцнення [159];

n_{eZ} - коефіцієнт впливу залишкових деформацій, що виникли в результаті механічного оброблення деталі.

Коефіцієнт концентрації напружень визначають за умови домінування нормальних (5.50) або крутних (5.51) напружень і з врахуванням емпіричних коефіцієнтів $q_{e\sigma}, q_{e\tau}$ чутливості матеріалу до концентрації напружень [80]:

$$n_{eK} = n_{e\sigma} = q_{e\sigma} \cdot (\alpha_{\sigma} - 1) + 1 \quad (5.50)$$

$$n_{eK} = n_{e\tau} = q_{e\tau} \cdot (\alpha_{\tau} - 1) + 1 \quad (5.51)$$

де $\alpha_{\sigma}, \alpha_{\tau}$ - теоретичний коефіцієнт концентрації напружень [264].

Коефіцієнт впливу абсолютних розмірів L визначається на основі теорії подібності втомного руйнування [159] за рівнянням характерним для змінного циклу згину та розтягу-стиску:

$$n_{eD} = 0,5 \cdot \left(1 + \left[0,0113 \frac{L}{G} \right]^{-Vc} \right) \quad (5.52)$$

Коефіцієнт впливу шорсткості поверхні n_{eR} можна визначити за формулою [257]:

$$n_{eR} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{\sigma_e}{20} \right) - 1 \right) \quad (5.53)$$

Причому, коефіцієнт впливу шорсткості в умовах домінування змінного кручення визначають за формулою [264]:

$$n_{eR} = 0,575 \cdot \left(1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{\tau_e}{20} \right) - 1 \right) \right) + 0,425 \quad (5.54)$$

Коефіцієнт впливу залишкових напружень n_{eZ} визначається в залежності від інтерференційного домінування залишкових напружень першого і другого

роду стиску $\sigma_{\epsilon I}^+, \sigma_{\epsilon II}^+$ (5.55) і розтягу $\sigma_{\epsilon I}^-, \sigma_{\epsilon II}^-$ (5.56), що отримуються в результаті механічного оброблення поверхонь деталі (див розд.4):

$$n_{\epsilon Z} = \frac{\sigma_{-1} + (\sigma_{\epsilon I}^+ + \sigma_{\epsilon II}^+)}{\sigma_{-1}} \quad (5.55)$$

$$n_{\epsilon Z} = \frac{\sigma_{-1} - (\sigma_{\epsilon I}^- + \sigma_{\epsilon II}^-)}{\sigma_{-1}} \quad (5.56)$$

У детерміністичному методі розрахунку [159, 257], тобто в такому, коли характеристики циклічного навантаження і втомної міцності розглядаються як детерміновані величини, формула для визначення коефіцієнта запасу міцності по згину виводиться з діаграми граничних амплітуд і має вигляд:

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a \cdot n_{\epsilon \Sigma} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m} \quad (5.57)$$

де σ_a, σ_m - амплітудне та медіанне значення залишкового напруження;

ψ_{σ} - коефіцієнт чутливості до асиметрії циклу навантаження.

Для деталі, що працює в умовах циклічної зміни дотичних напружень, обчислення коефіцієнтів запасу міцності роблять по формулі, аналогічній (5.57)

:

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a \cdot n_{\epsilon \Sigma} + \psi_{\tau} \cdot \tau_m} \quad (5.58)$$

Коефіцієнти чутливості до асиметрії циклу навантаження ψ_{σ} і ψ_{τ} визначають за формулами:

$$\psi_{\sigma} = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} ; \psi_{\tau} = \frac{2\tau_{-1} - \tau_0}{\tau_0}, \quad (5.59)$$

де $\sigma_{-1}(\tau_{-1})$ і $\sigma_0(\tau_0)$ - межі витривалості матеріалу відповідно по симетричному і віднульовому циклах напружень. Згідно ГОСТ 25.504-82 можна прийняти $\psi_{\tau} = 0,5\psi_{\sigma}$.

У загальному випадку плоского напруженого стану для визначення коефіцієнта запасу втомної міцності n_{-1} застосовують формулу Гафа і Поларда [264]:

$$n_{-1} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \quad (5.60)$$

де n_{σ}, n_{τ} - коефіцієнти запасу міцності відповідно для згину і кручення ((5.55) і (5.56)) при компонентах σ_a, σ_m , що змінюються регулярно по асиметричних циклах без дотримання синхронності і синфазності.

5.1.3. Математична модель корозійної стійкості з врахуванням технологічних чинників

Експлуатаційні характеристики деталей машин і механізмів визначаються в основному, властивостями поверхневих шарів деталі, оскільки усі процеси руйнування, особливо при циклічному навантаженні починаються, як правило, з поверхні і залежать від її будови і фізико-хімічного стану. Роль характеру недосконалості функціональної поверхні істотно зростає при корозійній втомі, оскільки вона спричинює руйнування захисних бар'єрних плівок, що знижують швидкість корозії за відсутності напружень, а також концентрацією специфічного виду напружень, що спричинюються пошкодженнями в результаті виникнення на поверхні корозійних каверн.

Щодо впливу технологічних чинників на корозійну стійкість матеріалу, слід окремо розглянути процеси фретинг- та електроемісійної корозії. У кожному з цих процесів прояв мікрогеометричних та залишково-деформаційних чинників створює відповідні умови інтенсивності прояву корозійних явищ при специфічних умовах експлуатації виробів.

Механізм фретинг-корозії достатньо описаний в спеціальній технічній літературі, проте формалізація інтенсивності механіко-хімічних процесів, а особливо їх залежність від мікротопології та залишкового напружено-деформованого стану спряжених поверхонь вивчений недостатньо [256, 307]. Так, при спряженні двох поверхонь контакт відбувається не по всій площі, а лише на відносно невеликому числі виступів мікронерівності. В результаті ковзання поверхонь однієї відносно іншої, нерівності однієї поверхні стирають нерівності протилежної і утворюється гладкий слід. У міжповерхневому

проміжку адсорбується газ або відбувається окислення спряжених поверхонь. Подальші переміщення мікрровиступів руйнують оксидну плівку. Вони можуть також механічно активувати реакцію адсорбції кисню на металі і сприяти утворення оксиду, який, у свою чергу, також стирається. Це і є механізм формування хімічної складової руйнування при фретинг-корозії. Зменшення мікронерівностей профілю внаслідок корозійного зношування формує механічну складову руйнування.

Крім того, деякі вчені [307] вказують також на динамічну складову фретинг-руйнування. Мікрочастинки металу, що відірвалися від суцільної маси виробу, являють собою високоміцні кристали оксиду металу з гострими виступами і виступають в ролі абразивної суспензії при контактній взаємодії рухомих деталей. З іншої сторони, зношування поверхонь сприяє зростанню віддалі між спряженими поверхнями, що, в свою чергу, впливає на те, що низький спочатку електричний опір між поверхнями стає високим. Проте, ця динамічна складова у значній мірі залежить від конструктивного виконання системи змащування і регенерації мастила та потребує додаткового опрацювання.

При протіканні фретинг-корозії з постійною швидкістю показники корозійної стійкості в об'ємному (5.61) або лінійному (5.62) еквіваленті визначають по формулах:

$$\tau_m = \frac{\Delta m}{v_m}, \quad (5.61)$$

$$\tau_l = \frac{\Delta l}{v_l}, \quad (5.62)$$

де τ_m - час до зменшення маси на одиницю площі на допустиму величину Δm ;

v_m - швидкість зменшення маси внаслідок фретинг-корозійного руйнування поверхонь деталі, кг/м²;

τ_l - час проникнення фретинг-корозії на допустиму (задану) глибину Δl ;

v_l - лінійна швидкість корозії.

Як і для розрахунку контактних деформацій, необхідно класифікувати мікроспряжені поверхні за геометричною формою у відповідності до форми змодельованих мікронерівностей, отриманих в результаті векторної суми геометрико-кінематичної, вібраційної та деформаційної складової (Розділ 4). В даному випадку приймаємо моделювання взаємодії сферичної поверхні і пластичного площинного півпростору, що вирішується за алгоритмом А.Ю. Ішлінського [126]. Крім того, при моделюванні трибоконтакту з урахуванням параметрів мікротопології поверхонь формули (5.22)-(5.29) повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні у відповідності до моделі Демкина [126, 281].

При терті мікровиступи лінійно рухаються по плоскій поверхні металу зі швидкістю v , причому кожен з них оголяє поверхню чистого металу і проробляє борозну з усередненою глибиною $(R_{pk_{ekv}} + R_{k_{ekv}})$. Після проходження мікровиступу на зруйнованій поверхні у відбувається швидка адсорбція атмосферного газу, яка з часом супроводжується утворенням тонкої оксидної плівки. Наступний мікровиступ, рухаючись по тій же борозні, знову руйнує і видаляє оксидне нашарування, залишаючи за собою оголений метал. Окислення відбувається за середній час t . Процес окислення відповідає логарифмічному закону [307]:

$$\Delta m = (R_{pk_{ekv}} + R_{k_{ekv}}) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right) \quad (5.63)$$

де k_o , τ - константи.

Слід також взяти до уваги, що окисленню передують швидка фізична адсорбція кисню, за якою з меншою швидкістю йде хемосорбція атомів кисню. Хемосорбований кисень, у свою чергу, взаємодіє з металом з утворенням оксиду металу. Ця реакція механічно активується при русі мікронерівностей по поверхні металу. Кількість оксиду, яка утворюється в результаті такого процесу, лімітується хемосорбцією. Швидкість хемосорбції відповідає рівнянню, ідентичному за формою рівнянню (5.63) [307]. Отже, який би процес не переважав, вид кінцевого виразу залишається по суті однаковим. До цього

аргументу можна і не прибїгати, оскільки логарифмічний член можна розкласти в ряд і оперувати далі тільки першим членом ряду. Він відповідає лінійній залежності швидкості окислення або адсорбції газу від часу. Лінійна залежність швидкості адсорбції газу вказує, що кількість кисню, присутня на чистій металевій поверхні у вигляді фізично адсорбованого газу, можна реально контролювати, на відміну від процесу переходу атомів кисню в хемосорбований стан.

Приймаючи до уваги всі чинники фретинг-корозії, можна записати рівняння втрати маси деталі при n_y циклах тертя [307]:

$$\Delta m = (k_{o1} \cdot \sqrt{N} - k_{o2} \cdot N) \cdot \frac{n_y}{\zeta} + k_{o3} \cdot \eta \cdot n_y \cdot N \quad (5.64)$$

де k_{o1}, k_{o2} - константи, що характеризують фізичну адсорбцію та хемосорбцію атомів кисню [307];

N - навантаження, що визначається за формулою (5.19) як $N = K_3 \cdot \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot \varepsilon^{\omega+\nu}$;

ζ - частота відносних коливань спряжених поверхонь;

k_{o3} - коефіцієнт, що залежить від висоти виступів мікронерівностей профілю ($R_p k_{ekv} + R_{k_{ekv}}$);

η - відносна площа контакту (див. формулу (5.21)):

$$\eta = \alpha^{\frac{\omega}{(\nu+\omega)}} \cdot t_m^{\frac{\omega}{(\nu+\omega)}} \cdot q_r^{\frac{\nu}{(\nu+\omega)}} \cdot K_3^{\frac{(\nu+\omega)}{\nu}} \cdot B^{\frac{(\nu+\omega)}{\nu}} \quad (5.65)$$

де α - коефіцієнт пружності мікровиступів (можна умовно прийняти $\alpha=0,5$ у випадку пружного контакту за умови забезпечення критерію Вільямсона-Грінвуда; або $\alpha=1,0$ у випадку пластичного контакту за умови перевищення індексом пластичності величини $0,5H$) [126, 253, 209];

t_m - відносна опорна довжина по середній лінії профілограми мікронерівностей профілю;

ν - параметр кривої Аббота;

q_r - питомий контактний тиск (за формулою (5.13));

B , ω - емпіричні коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу [126, 253, 209].

Перші два члени правої частини рівняння представляють хімічну складову фретинг-корозії. Ця величина зменшується з підвищенням частоти ζ , оскільки при цьому скорочується час протікання хімічної реакції (чи адсорбції) за один цикл. Останній член рівняння представляє механічний чинник, не залежний від частоти, але пропорційний висоті виступів мікронерівностей профілю ($R_{pk_{ekv}} + R_{k_{ekv}}$) і навантаженню N . Причому фретинг-руйнування може бути обумовлене більшою мірою як першим, так і другим чинником.

Аналіз впливу технологічних чинників (мікрогеометричних та залишково-деформаційних) на інтенсивність прояву електроемісійних корозійних явищ слід проводити для певних наперед встановлених умов експлуатації виробів. Розвиток корозійно-втомних пошкоджень функціональних поверхонь носить багатоосередковий характер і ініціюється виникненням на поверхні металу локальних вогнищ корозії на ділянках термодинамічної нестійкості. Вірогідність електроемісійного руйнування при циклічному вантаженні в корозійному середовищі конструкційних матеріалів визначається домінуванням одного з двох протилежних процесів: імовірністю виникнення і збільшення числа дефектів в процесі корозійної втоми електроемісійної природи і зменшення їх внаслідок релаксаційних процесів. Їх спільне вирішення [223, 224] дозволило встановити залежність відношення циклічної довговічності на повітрі N_ε до довговічності в корозійному середовищі $N_{\varepsilon c}$ у деталях з попередньо деформованими в результаті їх механічного оброблення поверхнями:

$$\ln\left(\frac{N_\varepsilon}{N_{\varepsilon c}}\right) = t \cdot \left(\frac{k_\varepsilon^{A_\varepsilon} \cdot V_c \cdot e^{\frac{z \cdot F \cdot (\phi_0 \pm \Delta\phi_\varepsilon)}{RT}} \cdot \Delta\varepsilon_a \cdot \omega \cdot t_c}{\Delta m/S} - \zeta \cdot e^{-\frac{U(\sigma)}{kT}} \right); \quad (5.66)$$

де $\Delta\varepsilon_a$ - дійсна амплітуда пластичної деформації;

$\Delta m/S$ – показник, що враховує утворення на поверхні металу площею S (m^2) оксидних плівок, що збільшують масу на Δm (кг);

t_c - час дії корозії при циклічному вантаженні;

k_ϵ - коефіцієнти концентрації деформації;

A - показник ступеня в рівнянні кривої деформаційного зміцнення при статичному вантаженні (при пластичній деформації, відмінній від рівномірної спостерігається більше посилення електрохімічної гетерогенності матеріалу, анодні процеси локалізуються за місцем концентрації напружень [223, 224]);

V_c - швидкість корозії матеріалу за наявності пластичної деформації (кг/(м²·с));

V_{c0} – константа, що визначає початкову швидкість корозії матеріалу [256];

z - валентність металу в іонізованому стані;

F - число Фарадея;

R - універсальна газова стала;

T - абсолютна температура на поверхні виробу;

φ_0 - стаціонарний електродний потенціал матеріалу в конкретному середовищі (В);

$\Delta\varphi_0$ - зміна електродного потенціалу під впливом пластичної деформації металу (В) [223, 224];

V - швидкість релаксаційних процесів, що описується рівнянням Ареніуса [256];

ζ - частотна характеристика матеріалу за рівнянням Ареніуса;

$U(\sigma)$ - енергія активації процесу релаксації, залежна від напруження [256];

k - стала Больцмана ($k \sim 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Результати вивчення кінетики корозії металу в повітрі як в стійкому середовищі часто беруться за основу розробки і перевірки інженерних методів розрахунку корозійної стійкості матеріалів.

Щодо корозійної стійкості оброблених поверхонь деталей, на основі аналізу реологічного моделювання технологічних переходів, можна зробити такі висновки:

1. В результаті збільшення швидкості різання (більше 150 м/хв) та зменшення подачі (менше 0,1 мм), питома величина деформаційної складової

мікронерівності збільшується (див. розд.4.2), що сприяє утворенню мікрорельєфу з значними значеннями глибини мікробпадін Rvk . Це спричинює зменшення концентрації оксидних продуктів на функціональній поверхні деталі, в результаті чого корозійна стійкість підвищується.

2. Підвищенню корозійної стійкості механічно-оброблених поверхонь деталей сприятиме ефект вибіркового переносу матеріалу спряжених поверхонь як результат самовільного утворення в зоні контакту пасивованої (без окислів) тонкої плівки з низьким опором зсуву, не здатної наклепуватись при терті, що може багаторазово деформуватись без руйнування. При цьому продукти зношування переходять з одної спряженої поверхню на іншу і утримуються в зоні трибоконтакту. Формування зони пластичної деформації визначається на основі функціонування модуля MicroCAE в складі САF-системи (див. рис. 2.1).

3. З іншої сторони, неоднорідний характер пластичної деформації в зоні різання, призводить до різниці потенціалів між неоднаково-деформованими кристалами, тобто до утворення маси гальванічних пар, що є причиною зменшення корозійної стійкості оброблюваного матеріалу заготовки. Дослідження реологічної картини залишкових напружень II роду при механічному обробленні матеріалу присвячені дослідження описані в розд.4.2.2. Формування зон неоднорідності фазових структур оброблюваного матеріалу заготовки визначається на основі функціонування модулю NanoCAE в складі САF-системи.

5.1.4. Математична модель мастильної утримуючої здатності функціональних поверхонь виробу з врахуванням технологічних чинників

Підвищення надійності та довговічності функціонування рухомих трибомеханічних систем забезпечується шляхом створення плосковершинного маслоутримуючого рельєфу з мастильними мікрозападинами на спряжених поверхнях виробів. Так, одним з найважливіших критеріїв працездатності рухомих з'єднань є дотримання режиму рідинного тертя між спряженими

поверхнями деталей шляхом забезпечення мінімальної товщини мастильної плівки в зоні їх трибоконтакту. Несуча здатність плівки може бути втрачена внаслідок надмірного навантаження опори при недостатній швидкості ковзання або внаслідок теплового руйнування. Як відомо [253], опір витисканню мастила з зони контакту суттєво зростає зі зменшенням товщини плівки, тому втрата маслостійкості в зоні трибоконтакту відбувається в основному як результат теплового руйнування мастильної плівки. Припустимо, що з якої-небудь причини температура в робочій зоні досягла такого значення, при якому внаслідок падіння в'язкості мастила і зменшення запасу товщини мастильного шару стався перехід рухомого спряження в режим напіврідинного контакту. Зростання коефіцієнта тертя призводить до прогресуючого збільшення тепловиділення до тих пір, поки температура мастильної плівки досягне критичного значення, при якому втрачаються її змащувальні властивості і виникає безпосередній контакт мікровиступів трибоспряжень.

Мінімальна товщина мастильного шару h_{\min} є основним параметром, що характеризує режим рідинного контакту. На відміну від ідеальних умов гідродинамічного тертя, трибоповерхні мають мікро- та макронерівності, спотворення геометричної форми, а іноді деформації і монтажні перекося осей, площин роз'єму тощо. У реальних умовах розділення спряжених поверхонь мастильним шаром настає при значно більшій товщині шару, ніж товщина граничного шару мастила ($0,1 \div 0,3$ мкм [253]). Робота підшипника в умовах рідинного трибоконтакту вважається стійкою при дотриманні умови:

$$h_{\min} = h_{кр} + 2 \text{ мкм}; \quad (5.67)$$

Гранична товщина шару $h_{кр}$, що є межею переходу рухомих спряжених поверхонь з напіврідинного режиму трибоконтакту в рідинний, є критичною мінімальною товщиною мастильного шару. Отже, невиконання цієї умови призводить до появи змішаного режиму, коли можливі ефекти місцевого температурного перевантаження і викликане даною причиною активне руйнування трибоповерхонь. У граничних умовах можливе виникнення сухого тертя, що викликає заїдання і заклинювання спряжених деталей.

У загальному випадку товщина шару h_{kp} включає в себе:

$$h_{kp} = (Rz_{\max 1} + Rz_{\max 2}) + (W_{\max 1} + W_{\max 2}) + (\Delta_{\max 1} + \Delta_{\max 2}) + (\Omega_{\max 1} + \Omega_{\max 2}), \quad (5.68)$$

де $Rz_{\max 1}, Rz_{\max 2}$ - висота мікронерівностей спряжених деталей в зоні трибоконтракту;

$W_{\max 1}, W_{\max 2}$ - висота макронерівностей спряжених деталей в зоні трибоконтракту.

Розрахунок цих макронерівностей зазвичай обмежується допусками на циліндричність, прийнявши $(W_{\max 1} + W_{\max 2})$ рівним половині суми допусків на відхилення контурів поперечного перерізу спряжених поверхонь деталей - $0,5 \cdot (IT_1 + IT_2)$.

$\Delta_{\max 1}, \Delta_{\max 2}$ - складові величини, що враховують в нормальному напрямку відхилення від взаємного розташування спряжених поверхонь по довжині трибоконтракту (перекіс осей, прогин пружної лінії, відхилення від циліндричності, бочкоподібність, конусність, огранка поверхонь тощо).

Так, для обертового механізму, прогин валу в цапфі можна розрахувати за формулою:

$$\Delta_{\max} = 1,6 \cdot X_o \cdot \frac{l}{L}, \quad (5.69)$$

де l, L - довжина ділянки валу в зоні трибоконтракту і загальна довжина валу, відповідно:

$$\Delta_o - \text{прогин валу (наприклад, для двоопорного валу } \Delta_o = \frac{m \cdot g \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I_x} \text{)}$$

$\Omega_{\max 1}, \Omega_{\max 2}$ - сумарні значення пружно-пластичних деформацій спряжених поверхонь деталей в зоні трибоконтракту (визначається в результаті імітації роботи виробу в системі MacroCAE).

Мінімальна товщина мастильного шару h_{\min} формується, виходячи з конструктивних параметрів опорних поверхонь трибоспряжень, якості мастила та динаміки роботи механізму, у склад якого входить виріб:

$$h_{\min} = 0,5 \cdot \psi \cdot D_1 \cdot \left(1 - \frac{e}{\delta}\right), \quad (5.70)$$

де $\psi = \frac{D_1 - D_2}{D_2}$ - відносний зазор у трибоспряженні;

D_1, D_2 - середньостатистичні діаметри охоплюваного і охоплювального отворів спряжених поверхонь деталей;

$\frac{e}{\delta}$ - номінальне значення відносного ексцентриситет масляного клину, що залежить від тиксотропних (або реопексних) властивостей мастил, тобто залежності в'язкості мастила від температури в зоні трибоконтракту. Ця температура, в свою чергу визначається з САЕ-системи на основі вирішення системи теплового балансу динамічної температури опори, породженої фрикційною взаємодією трибоконтракту а також теплотою, що відводиться мастилом та зовнішньою конвекцією.

Для надійності роботи механічної системи в режимі рідинного трибоконтракту, слід забезпечити коефіцієнт запасу S , який визначають за формулою:

$$S = \frac{h_{\min}}{h_{кр}}, \quad (5.71)$$

Значення коефіцієнта запасу не має бути менше $S=1,3 \div 1,5$, оскільки, окрім описаних вище параметрів, на величину мінімального проміжку можуть істотно впливати й інші похибки виготовлення спряжених поверхонь.

Проте, найбільшим резервом забезпечення стійкості та достатності об'єму масляного проміжку залишається величина усередненої глибини западин профілю, що визначають змащувальну здатність поверхні - R_{vk} [281, 321]:

$$h_{\min} = k_s \cdot R_{v_{ekv}} \quad (5.72)$$

де k_s - емпіричний коефіцієнт пропорційності [253].

5.2. Постановка задачі та методика структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

У умовах багаторівневого вибору рішень на різних етапах проектування технологічного процесу спочатку вирішується питання структурної оптимізації. У подальшому після вибору певної структури маршруту проектування, операції, позиції, переходу або різних видів технологічної оснащення повинна ставитися завдання їх параметричної оптимізації. При структурному підході, як різновиді системного, вимагається синтезувати варіанти системи з компонентів (блоків) і оцінювати варіанти при їх частковому переборі з попереднім прогнозуванням характеристик компонентів. Блоково-ієрархічний підхід до проектування використовує ідеї декомпозиції складних описів об'єктів і відповідно засобів їх створення на ієрархічні рівні і аспекти, вводить поняття стилю проектування (висхідне і низхідне), встановлює зв'язок між параметрами сусідніх ієрархічних рівнів.

Класичний алгоритм *об'єктно-орієнтованого* технологічного проектування передбачає виконання ряду послідовних взаємопов'язаних етапів неітераційного низхідного структурно-параметричного синтезу. Спочатку на основі вхідних даних (макрогеометрична конфігурація деталі, матеріал, її розмірно-вагові характеристики, точність геометричних розмірів та взаєморозташування поверхонь, фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі, тип та організаційна форма виробництва) формується маршрут механічного оброблення виробу, потім визначається структура технологічних операцій, переходів, призначаються режими оброблення а відтак проектується або підбирається технологічне оснащення, інструмент тощо. При цьому технолог повністю абстрагується від проблем функціонального (експлуатаційного) характеру об'єкту виробництва, справедливо вважаючи, що призначення норм точності та якості – це прерогатива конструктора [280, 281, 284, 287].

Основним критерієм формування оптимальної структури та параметрів *об'єктно-орієнтованого* технологічного процесу є забезпечення мінімальної

собівартості виготовлення об'єкту виробництва (виробу) при дотриманні формалізованих показників якості (точності, шорсткості, фізико-механічних властивостей окремих поверхонь) та заданих виробничою програмою обсягів виготовлення продукції з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва. Проте об'єктивні умови розвитку ринкової економіки визначають необхідність цільової орієнтації наукових досліджень, процесів проектування та виробництва виробів машинобудування на формування більш високого рівня якості, ніж у конкурентів протягом життєвого циклу (ЖЦ) продукції. В результаті поступового насичення ринку взаємозамінними виробами-аналогами ефективність цінової конкуренції знижується, а нецінової (як результат розширення та вдосконалення експлуатаційних властивостей) підвищується, що обумовлює актуальність пошуку нових критеріїв оцінки і технологій управління якістю різноманітних технічних систем на кожному з етапів ЖЦ. Структурність якості складає основу фундаментального для кваліметрії принципу функціонально-кібернетичної еквівалентності [122].

Головною особливістю *функціонально-орієнтованого проектування* є те, що первинним у формуванні структури та параметрів технологічних операцій і переходів є забезпечення комплексу функціонально-експлуатаційних властивостей виробу при дотриманні заданих параметрів точності, а також організаційних та техніко-економічних обмежень. У даному випадку функцією мети при прийнятті рішень про оптимальну структуру та параметри технологічного процесу є інтегральний кваліметричний критерій технічного рівня виробу, що системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо найбільш навантажених поверхонь виробу і отримується як результат формування в процесі різання мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій.

У роботах [121, 122, 136] доведена адекватність моделювання множини показників якості технологічної системи i -го виробу $\{F_i\} = \{q_1, q_2, q_3 \dots q_N\}$ і взаємопов'язаних зв'язків між ними $\{q_k \Leftrightarrow q_m\}$, як єдиної інформаційної системи при умові забезпечення обмежень $\{L_i\} = \{Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_S\}$. Згідно з

принципом функціонально-кібернетичної еквівалентності, чим більше число модельованих показників якості N та обмежень S , тим вища альтитуда моделі, в результаті чого зменшується множина зв'язків $\{q_k \Leftrightarrow q_m\}$. На кожному рівні моделі, в якій не використовуються суб'єктивні експертні методи генерування технологічних рішень, потрібно враховувати тільки ті функціонально-експлуатаційні властивості, що характеризують систему в цілому, а також реалізувати аналіз альтернативних варіантів структурно-параметричних рішень за єдиним комплексним критерієм $K(F_i)$ технічного рівня. При цьому управління якістю проектування полягає в цільовій дії на елементи безлічі механічних властивостей об'єкту виробництва, що визначають відповідність проекту вектору оцінних критеріїв i -го виробу $\{F_i\}$. Вектор ознак якості i -го виробу $\{q_1, q_2, q_3 \dots q_N\}$ відображає певне поєднання результуючих параметрів проектування R_e і, відповідає деякій точці Y в N -мірному абстрактному просторі Y_n . Адекватне відображення множини ознак якості Y на числову вісь [122]:

$$f: Y \rightarrow R_e \quad (5.73)$$

де $f \subset Y \cdot R_e$ - функціональне відношення, що визначає міру впливу функціонально-експлуатаційної якості деталі у виробі;

Непорожня підмножина якісних станів виробу, що забезпечують досягнення мети функціонально-орієнтованого технологічного проектування, відповідає простору, обмеженому за допомогою певних меж: $\sup q_n \cup \inf q_n \forall n = \overline{1, N}$, фізичний зміст яких обумовлений критеріями енергетичної ефективності, міцності, жорсткості, точності, надійності та інш. При цьому проектувальникові слід описати цю систему в термінах технічних характеристик об'єкту виробництва, тобто квантифікувати спільну мету на сукупність локальних критеріїв якості за умови забезпечення наперед сформульованих САЕ-системою обмежень.

Обмеження $\{L_i\}$, сформульовані системою MacroCAE до кожної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) або до i -ї деталі в цілому класифікуються наступним чином:

- абсолютна точність (Q_{ij1});
- відносна точність взаємного положення j -ї та k -ї поверхні (Q_{ijk2});
- міцність (Q_{ij3});
- жорсткість (Q_{i4});
- шорсткість (Q_{ij5}).

Серед найбільш важливих $\{F_i\}$ характеристик функціональної ефективності слід класифікувати наступні локальні критерії певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі:

- зносостійкість (q_{ij1});
- триботехнічна якість спряжень (q_{ij2});
- втомна міцність (q_{ij3});
- корозійна стійкість (q_{ij4});
- мастильна утримуюча здатність (q_{ij5});
- властивість оптичного віддзеркалення (q_{ij6});
- властивість теплового віддзеркалення (q_{ij7});
- властивість забезпечення герметичності з'єднань (q_{ij8}).

Кожне сполучення вхідних даних для відповідного варіанту структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу відображається у N -мірному просторі зважених показників якості, за якими оцінюється відповідність виробу поставленим вимогам:

$$F_{opt} \{q_1, q_2, q_3 \dots q_N\} \rightarrow \max \quad (5.74)$$

Єдиний комплексний критерій $K(F_i)$ технічного рівня, значення якого є інваріантним рівню кваліметричної моделі, визначається системою лінійних рівнянь, поданою в матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} & q_{15} & q_{16} & q_{18} & q_{18} & -1 \\ 0 & q_{22} & q_{23} & q_{24} & q_{25} & q_{26} & q_{27} & q_{28} & -1 \\ 0 & 0 & q_{33} & q_{34} & q_{35} & q_{36} & q_{37} & q_{38} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & q_{45} & q_{46} & q_{47} & q_{48} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} & q_{56} & q_{57} & q_{58} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{66} & q_{67} & q_{68} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{77} & q_{78} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_{88} & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \\ \alpha_8 \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.75)$$

де $\left\{ \alpha_n \left(\forall n = \overline{1,8} \right) \right\}$ - матриця-стовбець вагових коефіцієнтів кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі. Причому $\alpha_n \geq 0 \forall n = \overline{1,8}$ і $\sum_{n=1}^N \alpha_n = 1,0$.

В залежності від фізичного змісту функціонально-експлуатаційної властивості виробу, отриманої в результаті виконання технологічного процесу з визначеною структурою та параметрами можливе використання різних кваліметричних шкал (лінійної [325], експотенційної та показникової [122]), для яких загальним є :

— зміна значень оціночних функцій в інтервалі $[0; 1]$, причому нулю відповідає найменш переважне значення оцінюваної властивості, а одиниці — найбільш прийнятне;

— існування робочого інтервалу аргументу $[q_n^{\min}; q_n^{\max}]$, поза яким функція $\{F_{in}\}$ набуває постійних значень.

Причому зростання пріоритету $\alpha_n \left(\forall n = \overline{1,8} \right)$ будь-якого вагового коефіцієнту кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі зменшується із зростанням значення номінального значення цієї ознаки якості.

Враховуючи мінімаксний характер впливу окремих локальних критеріїв на експлуатаційні властивості об'єкту виробництва (тобто, наприклад,

оптимальною ознакою є набуття максимальної зносостійкості ($q_{ij1} \rightarrow \max$) або мінімального коефіцієнту тертя, що забезпечує триботехнічну якість спряжень ($q_{ij2} \rightarrow \min$), для кожного локального критерію слід визначити значення супремуму та інфімуму зі всієї множини допустимих значень окремого операнда (локального критерію). Принцип їх визначення можна виразити формулою:

$$q_n^{\max} = \sup \left\{ q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N} \right\} \quad (5.76)$$

де \sup (супремум) – операнд виділення найбільш ефективного (з функціональної точки зору) значення кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі за n -ю ознакою;

$$q_n^{\min} = \inf \left\{ q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N} \right\} \quad (5.77)$$

де \inf (інфімум) – операнд виділення найменш ефективного (з функціональної точки зору) значення кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі за n -ю ознакою.

Наявність єдиного комплексного критерію $K(F_i)$ технічного рівня виробу визначає необхідність розроблення методики та алгоритму вирішення багатокритерійної оцінки якості виробу. Найбільш ефективним інструментарієм можна вважати метод звертання множини показників в єдиний, еквівалентний за умовами комутативності та безперервної диференціації в просторі показників $\{F_i\}$ по всіх показниках функціональної ефективності $\left\{ q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N} \right\}$ кожної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі. В даному випадку параметричною формою оператора звертання можна вважати адитивну нормувальну форму виду [122]:

$$K(F_i) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot q_n \neq 0 \forall n = \overline{1, N} \quad (5.78)$$

де $\alpha_n (\forall n = \overline{1, N})$ - матриця-стовбець вагових коефіцієнтів кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі.

Систематизація номенклатури найбільш важливих показників функціональної ефективності виробів, отриманих як результат реалізації функціонально-орієнтованих технологій машинобудування, подано в табл.5.4.

Алгоритм розрахунку узагальненого нормативного критерію оптимізації структурно-параметричного варіанту технологічного рішення реалізовано за допомогою розробленої автором [287, 288] програми з використанням програмних продуктів EXCEL та Visual Basic. Так, на Рис.5.2 наведений приклад розрахунку узагальненого кваліметричного показника $K(F_i)$. Вихідними даними для такого розрахунку є (етап I підпрограми) функціональні варіативні значення кваліметричних показників, визначених як результат реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу (див табл.5.4) : параметр питомого зношування (інтенсивність зношування) (для наведеного прикладу - $I_h = 5,83 \times 10^{-5}$); коефіцієнт запасу втомної міцності ($n_{-1} = 3,22$); параметр триботехнічної якості спряжень (коефіцієнта тертя) ($f = 0,15$); параметр корозійної стійкості - швидкість зменшення маси внаслідок фретинг-корозійного руйнування поверхонь деталі ($\tau_m = 4,8 \times 10^{-3}$, кг/м²); коефіцієнт запасу рідинного трибоконтакту ($S_t = 2,21$). Як результат попередніх ітерацій аналізу структури та параметрів технологічного процесу, розраховані за формулами (5.76) і (5.77) значення \inf (інфімуму) і \sup (супремуму) кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі за n -ю ознакою (етап II підпрограми).

Табл.5.4. Загальна характеристика типових показників функціональної ефективності виробів

Назва властивості	Показник	Залежність від вихідних показників функціонально-орієнтованого технологічного проектування
Зносостійкість	<p>Інтенсивність зношування I_{hj} функціональної поверхні за видами:</p> $q_{ij1} = I_{hj}$ <p>$\exists I_{hj} \rightarrow \forall (I_{h_cхопл} \wedge I_{h_тепл} \wedge I_{h_аобр}) \leq [I_{руйн}]$</p>	$q_{ij1} = \frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda}{\sqrt{v_{ekv}} (v_{ekv}^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \quad 1$ $\forall q_{ij1} = \frac{\alpha \cdot b_{ekv} \cdot \varepsilon^{(v_{ekv}+1)} \cdot R \max_{ekv} \cdot \lambda}{(v_{ekv} + 1) \cdot n \cdot d} \quad 2$ $\lambda = \left(\frac{\sigma_\epsilon + \sigma_{\epsilon II}^+}{\sigma_a} \right)^{t_y} \quad \vee \quad \lambda = \left(\frac{\sigma_\epsilon - \sigma_{\epsilon II}^-}{\sigma_a} \right)^{t_y}$ $q_{ij1} = F(b_{ekv}, v_{ekv}, R \max_{ekv}, tm_{ekv}, \sigma_{\epsilon II}^\pm)$
Триботехнічна якість спряжень (енергетичні втрати на тертя в спряжених поверхнях деталей машин)	<p>Сила тертя F_S в трибоконтакті:</p> $q_{ij2} = F_S = f(b_{ekv}, v_{ekv}, R \max_{ekv}, tm_{ekv}) \times$ $\times \int_A p dA$	$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,55 K_V^n \sqrt{\frac{R \max_{ekv}}{r b_{ekv}^{1/v_{ekv}}}} \cdot \left(\frac{2pc}{HB} \right)^{1/2 v_{ekv}} ;$ $q_{ij2} = F(b_{ekv}, v_{ekv}, R \max_{ekv}, tm_{ekv})$

¹ У випадку пружного контакту шорстких поверхонь (коли умова Вільямсона-Грінвуда виконується)

² У випадку пластичного контакту шорстких поверхонь (коли умова Вільямсона-Грінвуда не виконується)

Назва властивості	Показник	Залежність від вихідних показників функціонально-орієнтованого технологічного проектування
Втомна міцність	<p>Коефіцієнт запасу n_{-1} по втомній міцності:</p> $q_{ij3} = n_{-1} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}$ $n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a \cdot n_{\sigma\Sigma} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m};$ $n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a \cdot n_{\tau\Sigma} + \psi_{\tau} \cdot \tau_m}$ $n_{\sigma\Sigma} = \left(\frac{n_{\sigma K} + \frac{1}{n_{\sigma D}} - 1}{n_{\sigma R}} \right) \cdot \frac{n_{\sigma Z}}{n_{\sigma V}}$	$n_{\sigma R} = 0,575 \cdot \left(1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{\tau_{\sigma}}{20} \right) - 1 \right) \right) + 0,425$ $n_{\sigma Z} = \frac{\sigma_{-1} + (\sigma_{\sigma l}^+ + \sigma_{\sigma ll}^+)}{\sigma_{-1}};^3 \vee n_{\sigma Z} = \frac{\sigma_{-1} - (\sigma_{\sigma l}^- + \sigma_{\sigma ll}^-)}{\sigma_{-1}}^4$ $q_{ij3} = F(R_{\max}, \sigma_{\sigma l}^{\pm}, \sigma_{\sigma ll}^{\pm})$
Корозійна стійкість	<p>Показники корозійної стійкості в об'ємному або лінійному еквіваленті:</p> $q_{ij4} = \left\{ \tau_m = \frac{\Delta m}{v_m} \vee \tau_1 = \frac{\Delta l}{v_1} \right\};$	$\Delta m = \left(k_{o1} \cdot \sqrt{N} - k_{o2} \cdot N \right) \cdot \frac{n_y}{\zeta} + k_{o3} \cdot \eta \cdot n_y \cdot N$ $N = K_3 \cdot \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot \varepsilon^{\omega+v};$ $\eta = \alpha^{\frac{\omega}{(v+\omega)}} \cdot t_m^{\frac{\omega}{(v+\omega)}} \cdot q_r^{\frac{v}{(v+\omega)}} \cdot K_3^{\frac{(v+\omega)}{v}} \cdot B^{\frac{(v+\omega)}{v}}$ $q_{ij4} = F(b_{ekv}, v_{ekv}, Rpk_{ekv} + Rk_{ekv}, tm_{ekv})$

³ У випадку інтерференційного домінування залишкових напружень стиску першого і другого роду $\sigma_{\sigma l}^+, \sigma_{\sigma ll}^+$ (6.57)

⁴ У випадку інтерференційного домінування залишкових напружень розтягу першого і другого роду $\sigma_{\sigma l}^-, \sigma_{\sigma ll}^-$ (6.58)

Назва властивості	Показник	Залежність від вихідних показників функціонально-орієнтованого технологічного проектування
Мастильна утримуюча здатність	Коефіцієнт запасу рідинного трибоконтакту: $q_{ij5} = S = \frac{h_{\min}}{h_{kp}}$	$h_{kp} = R \max_{ekv} + \sum W_{\max} + \sum X_{\max} + \sum Y_{\max}$ $h_{\min} = k_S \cdot Rv_{ekv}$ $q_{ij5} = F(R \max_{ekv}, Rv_{ekv})$

Прийняті позначення: $I_{h_схопл}$; $I_{h_менл}$; $I_{h_абр}$; $I_{h_втомн}$ - інтенсивність зношування за видами (схоплювання 1-го і 2-го роду, абразивне, втомне, відповідно); p - тиск на елементарній площині dA контакту визначеної форми; f - коефіцієнт тертя; τ_0 - опір зсуву; $HВ$ - твердість матеріалу по Брінелю; β - безрозмірний коефіцієнт зміцнення молекулярного зв'язку [171, 172, 304]; b_{ekv} - безрозмірний еквівалентний (по Дьомкіну [126]) параметр опорної поверхні; v_{ekv} - еквівалентний параметр степеневі апроксимації кривої Аббота; $R \max_{ekv}$ - еквівалентний параметр максимальної висоти мікронерівностей профілю; tm_{ekv} - еквівалентний параметр опорної довжина по середній лінії профілограми мікронерівностей профілю; C - безрозмірний коефіцієнт, що залежить від форми виступів мікронерівностей профілю [209]; σ_{el}^+ , σ_{el}^- - залишкові напруження I-го роду стиску і розтягу; σ_{ell}^+ , σ_{ell}^- - залишкове напруження II-го роду стиску і розтягу, що визначаються на основі аналізу реологічної моделі алотропних перетворень; σ_a - дійсне значення еквівалентного напруження на поверхні тертя, що визначаються на основі аналізу САЕ - моделі; t_y - коефіцієнт фрикційної втоми при пружному контакті спряжених поверхонь [323]; τ_m - час до зменшення маси на одиницю площі на допустиму величину Δm ; v_m - швидкість зменшення маси внаслідок фретинг-корозійного руйнування поверхонь деталі; τ_l - час проникнення фретинг-корозії на допустиму (задану) глибину Δl ; v_l - лінійна швидкість корозії; k_{o1} , k_{o2} - константи, що характеризують фізичну адсорбцію та хемосорбцію атомів кисню [307]; N - навантаження на в зоні трибоконтакту; ζ - частота відносних коливань спряжених поверхонь; k_{o3} - коефіцієнт, що залежить від висоти виступів мікронерівностей профілю ($R_p k_{ekv} + R_k k_{ekv}$); η - відносна площа; α - коефіцієнт пружності мікровиступів; h_{kp} - гранична товщина мастильного шару в зоні трибоконтакту; h_{\min} - мінімальна товщина мастильного шару; W_{\max} - висота макронерівностей деталі в зоні трибоконтакту; X_{\max} - величина похибки від взаємного розташування спряжених поверхонь по довжині трибоконтакту; k_S - емпіричний коефіцієнт пропорційності [253].

Показники вагових коефіцієнтів $\left| \alpha_n (\forall n = \overline{1,5}) \right|$ кожного q_{ijn} -го локального критерію певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі призначаються проектантом апріорно (етап III підпрограми – Рис.5.2), але їх нормування (приведення до виду $\sum_{n=1}^N \alpha_n = 1,0$ пропорційно до номінальних значень цих коефіцієнтів) виконується в автоматизованому режимі (етап IV підпрограми – Рис.5.2) [287].

Розрахунок ненормалізованих локальних критеріїв оптимізації за кваліметричними показниками (етап V даної підпрограми – Рис.5.2) виконується за наведеним вище алгоритмом і становить для даного прикладу за показником зносостійкості $Q_1 = 0,19$; за коефіцієнтом запасу втомної міцності $Q_2 = 0,08$; за параметром триботехнічної якості спряжень $Q_3 = 0,06$; за параметром корозійної стійкості $Q_4 = 0,05$; за коефіцієнтом запасу рідинного трибоконтакту $Q_5 = 0,14$. Нормалізація цих показників (етап VI даної підпрограми – Рис.5.2) дозволяє побудувати павутину якості нормалізованих кваліметричних показників, що становитимуть для наведеного прикладу за показником зносостійкості $Q_{1H} = 0,40$; за коефіцієнтом запасу втомної міцності $Q_{2H} = 0,15$; за параметром триботехнічної якості спряжень $Q_{3H} = 0,12$; за параметром корозійної стійкості $Q_{4H} = 0,09$; за коефіцієнтом запасу рідинного трибоконтакту $Q_{5H} = 0,27$. Остаточню узагальнену критерій оптимізації (етап VII даної підпрограми – Рис.5.2), що визначається за формулою (5.78) дорівнює 0,519 [287].

**Підпрограма лінійного нормування
кваліметричних критеріїв оптимізації
функціонально-орієнтованого технологічного процесу**

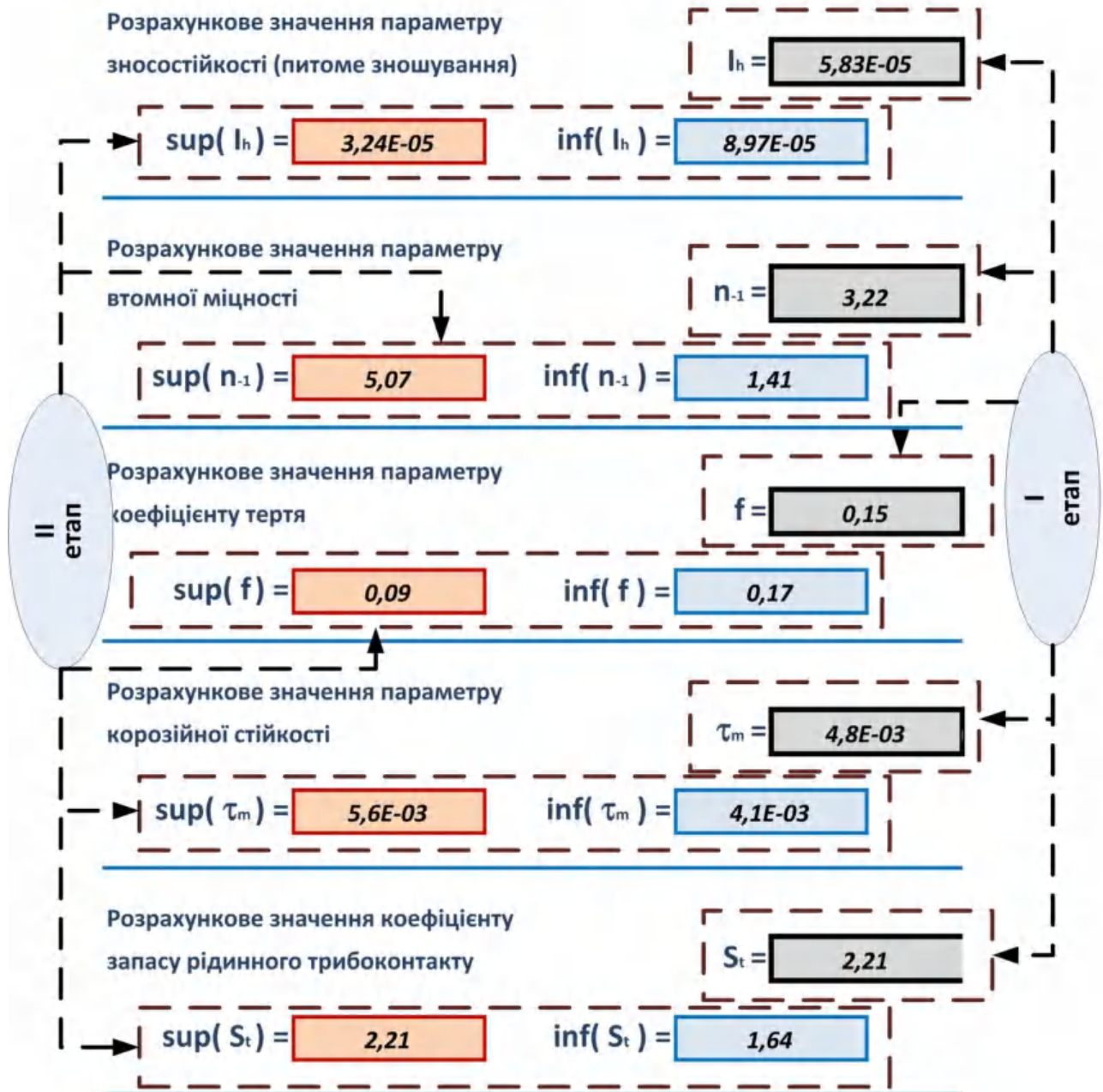


Рис.5.2. Фрагмент підпрограми лінійного нормування кваліметричних критеріїв та розрахунку функції мети структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

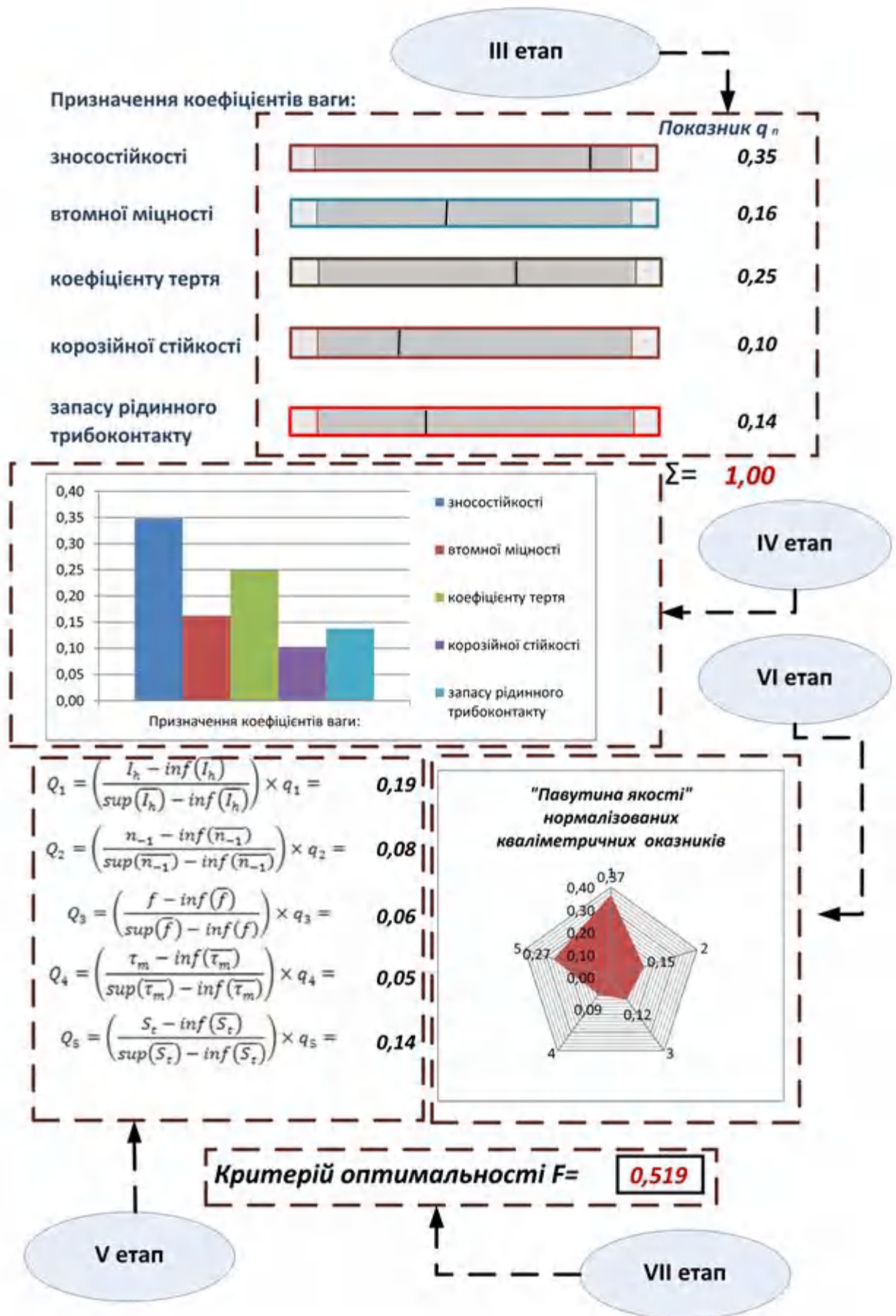


Рис.5.2. (продовження)

5.3. Математично-логічний апарат та узагальнений алгоритм структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

У загальному вигляді завдання структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу можна сформулювати як вирішення задачі поєднання найкращої його структури та параметрів (режимів оброблення) з метою досягнення глобального оптимуму – узагальненого кваліметричного показника, що забезпечує найефективніші умови функціонування цього виробу.

Блок-схема алгоритму структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу наведена на Рис.5.3 і складається з таких етапів [287, 288]:

1. Етап інтерактивного внесення інформації (вхідних даних) в систему (блоки 2-3).

2. Етап моделювання виробу, його попереднього інженерного аналізу та формування вихідного варіанту структури і параметрів технологічного процесу (блоки 4-6).

3. Етап моделювання та аналізу напружено-деформованого стану виробу в процесі його формоутворення, реалізований в САЕ-системі (блоки 9-12).

4. Етап розрахунку локального критерію - інтенсивності зношування функціональних поверхонь в умовах потенційного функціонування виробу в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь (блоки 14-32).

5. Етап розрахунку локального критерію - коефіцієнту запасу за показником втомної міцності функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь (блоки 33-46).

6. Етап розрахунку локального критерію - показника залежності динамічної якості трибоспряжень функціонально-важливих поверхонь деталі в залежності від структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу їх формоутворення (блок 47).

7. Етап розрахунку локального критерію - коефіцієнту запасу рідинного трибоконтракту функціональних поверхонь деталі в імовірних умовах їх функціонування у виробі в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу (блоки 48-51).

8. Етап розрахунку локального критерію - параметру залежності корозійної стійкості (фретінг-корозії) поверхонь деталі в умовах потенційного функціонування виробу від структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь (блоки 52-56).

9. Етап інтерактивного лінійного нормування кваліметричних критеріїв та поточного розрахунку функції мети вибраного структурно-параметричного варіанту функціонально-орієнтованого технологічного процесу (блоки 57-69).

10. Етап направленого пошуку альтернативних варіантів структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу за евристичними правилами (блоки 70-77).

11. Етап формалізації результатів структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу за системним кваліметричним критерієм (блок 78).

Розглянемо алгоритм структурно-параметричної оптимізації більш докладно.

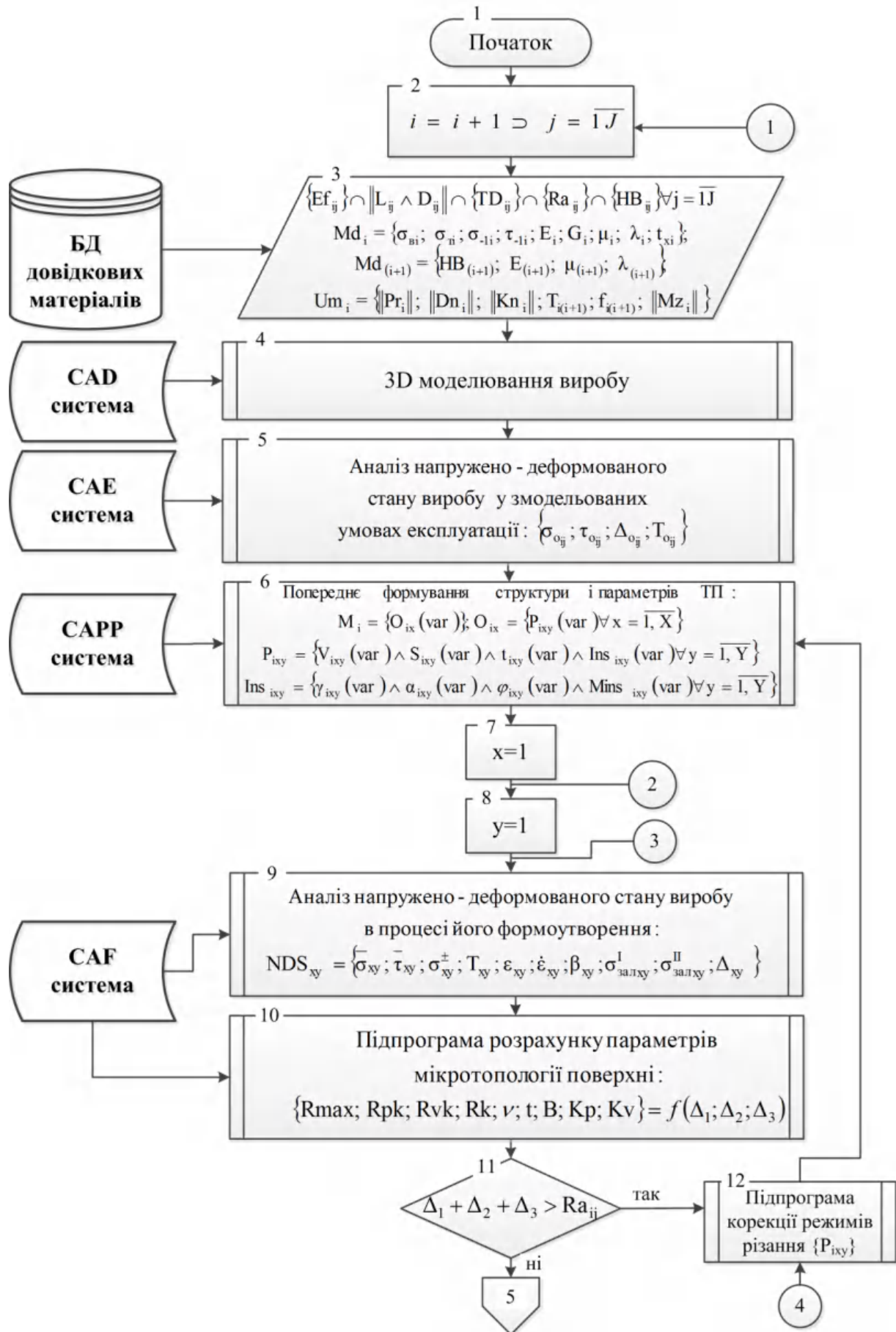


Рис.5.3. Блок-схема алгоритму структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

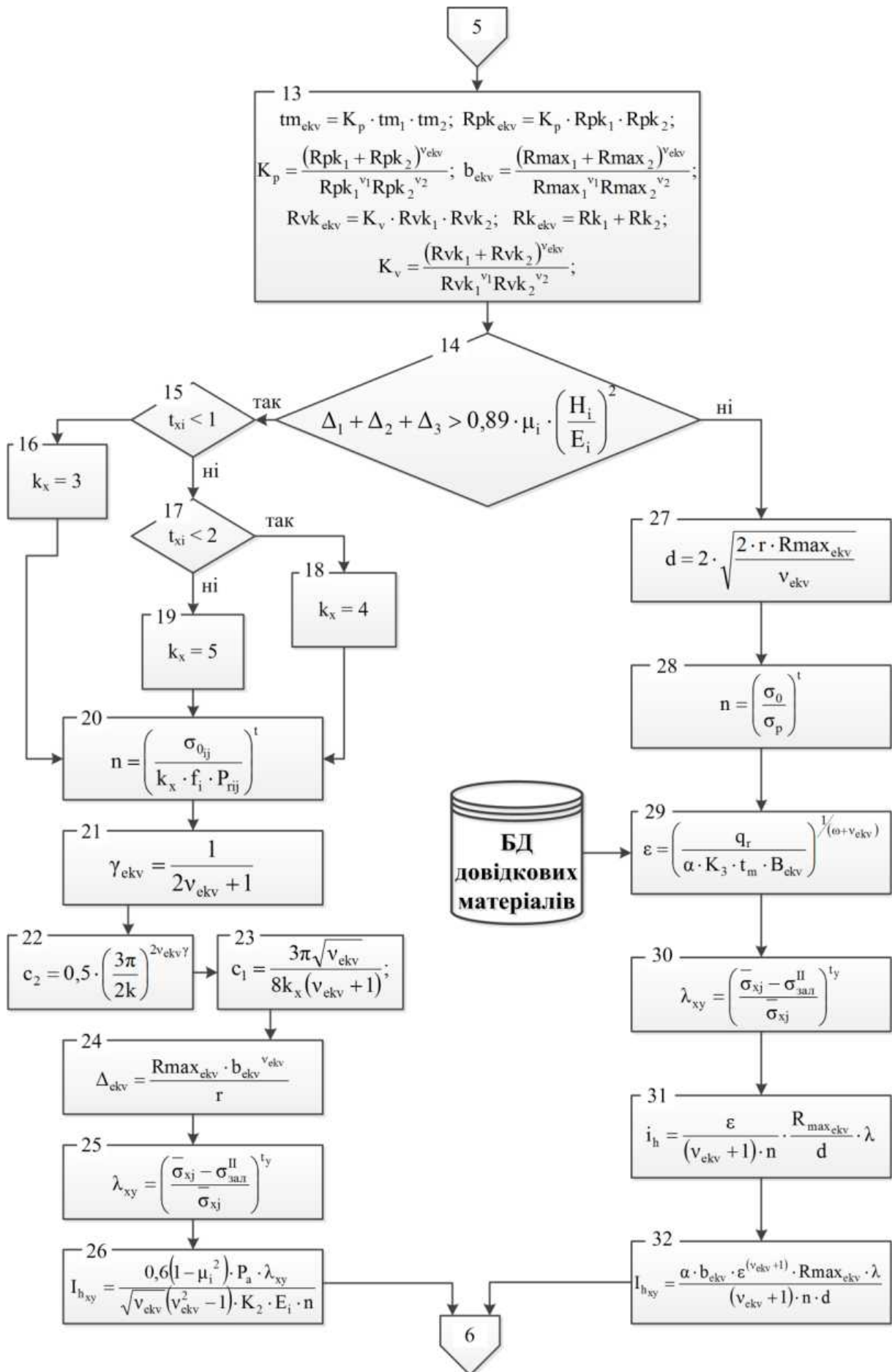


Рис.5.3. (продовження)

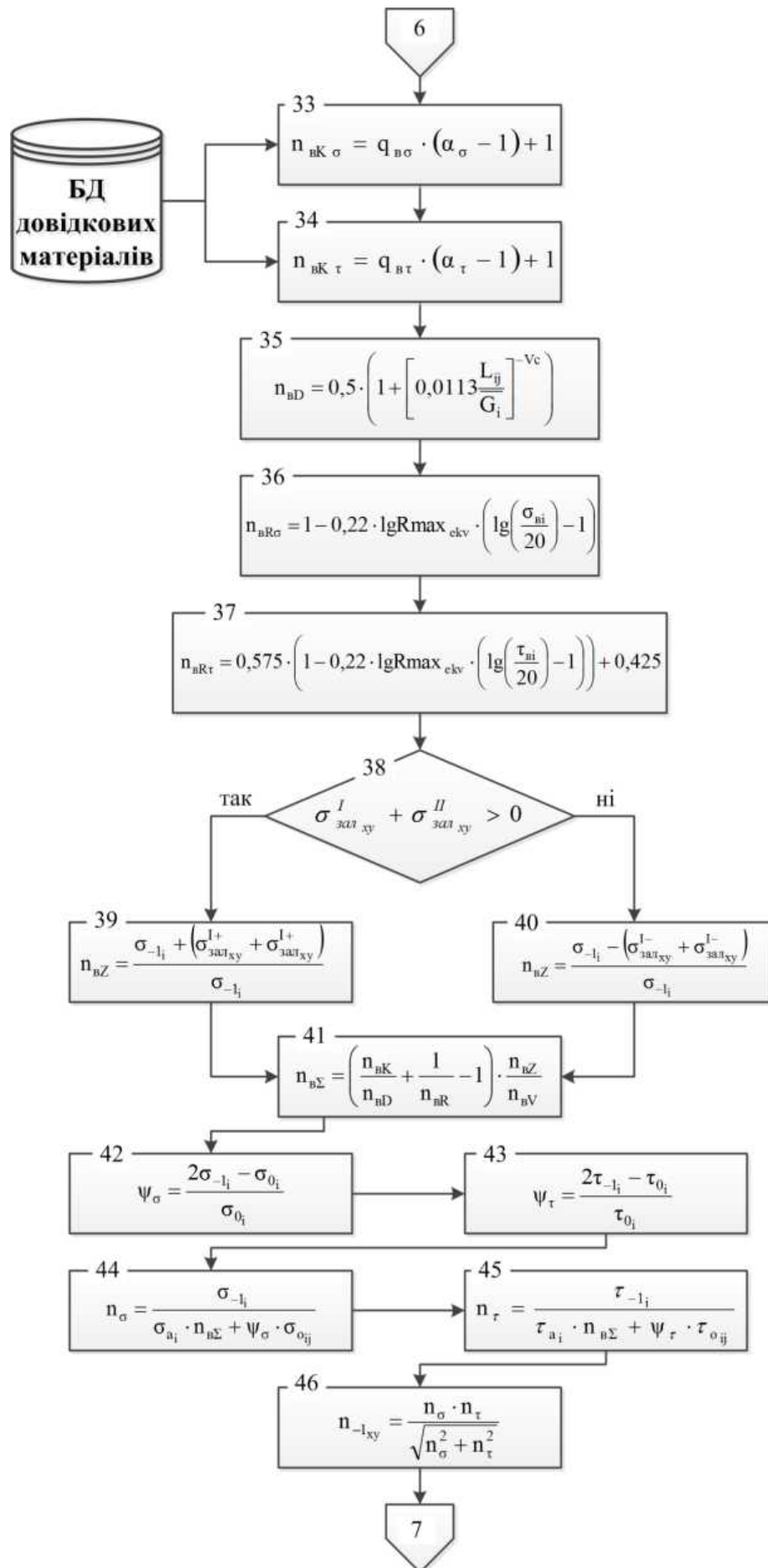


Рис.5.3. (продовження)

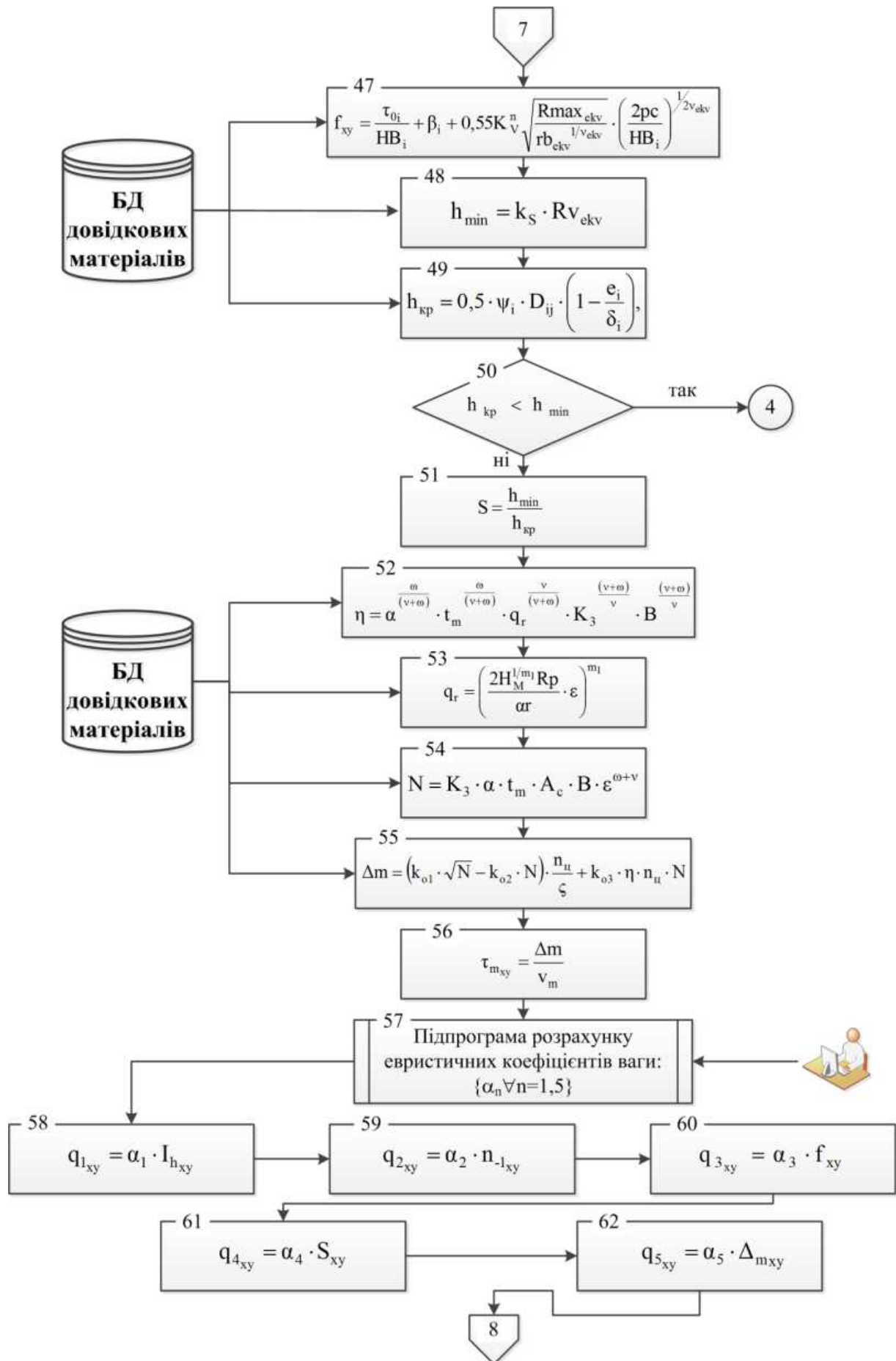


Рис.5.3. (продовження)

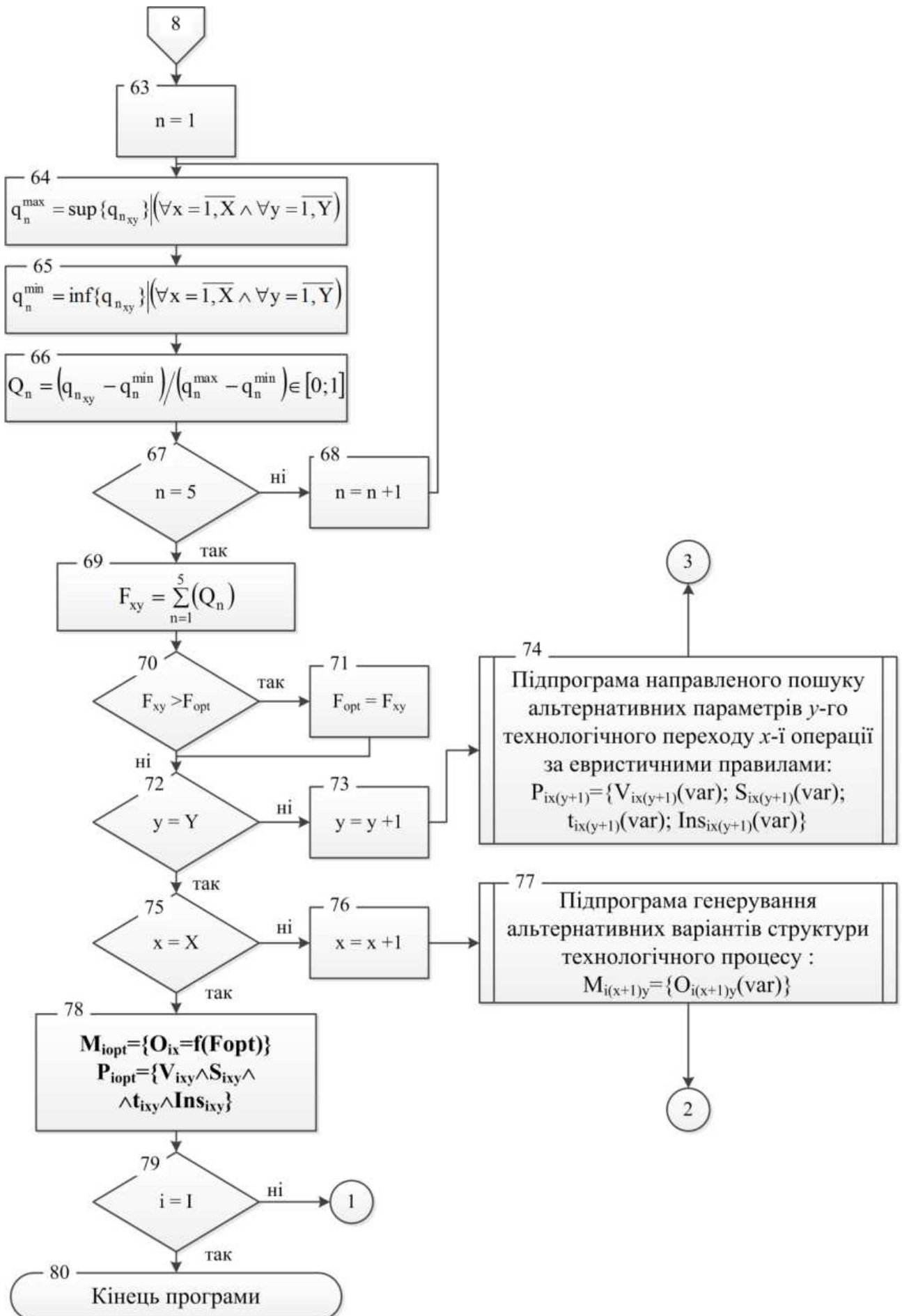


Рис.5.3. (продовження)

Для кожної i -ї деталі, що включає в себе $j = \overline{1J}$ поверхонь в систему інтерактивно вносять конструкторську інформацію $\{Ef_{ij}\} \cap \|L_{ij} \wedge D_{ij}\| \cap \{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\} \cap \{HB_{ij}\}$ про такі параметри, як геометрична форма $\{Ef_{ij}\}$ всіх $\forall j = \overline{1J}$ поверхонь деталі, їх розміри $\|L_{ij} \wedge D_{ij}\|$, параметри точності та шорсткості $\{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\}$ та задані параметри міцності $\{HB_{ij}\}$ (блок 1 – Рис.5.3). Крім того, формалізації підлягають фізико-механічні показники матеріалу даної деталі $Md_i = \{\sigma_{vi}; \sigma_{ti}; \sigma_{-li}; \tau_{-li}; E_i; G_i; \mu_i; \lambda_i; t_{xi}\}$ та матеріалу спряжених з нею деталей $Md_{(i+1)} = \{HB_{(i+1)}; E_{(i+1)}; \mu_{(i+1)}; \lambda_{(i+1)}\}$. Важливим є також формальна інтерпретація особливих умов Um_i силового $\|Pr_i\|$ навантаження, динамічної $\|Dn_i\|$ кінематичної $\|Kn_i\|$, температурної $T_{i(i+1)}$ взаємодії та параметрів трибоконтакту $f_{i(i+1)}$ зі спряженими деталями у виробі а також кінематичних обмежень $\|Mz_i\|$, що встановлюються конструктором в процесі функціонування деталі: $Um_i = \{\|Pr_i\|; \|Dn_i\|; \|Kn_i\|; T_{i(i+1)}; f_{i(i+1)}; \|Mz_i\|\}$. Очевидно, що більшість цих показників визначається з статистичного або довідкового репозиторію даних.

3D моделювання (блок 4) – це стандартний етап практично усіх сучасних систем автоматизованої технологічної підготовки виробництва. В даному випадку доцільно представити геометричну інформацію у форматі двовимірної векторної графіки *IGES (Initial Graphics Exchange Specification)* або *GEO (Graphics Engineering Object Data)*, що є форматом векторних тривимірних зображень, який переважно асоційований з *VideoScape 3D Object*. Таке представлення дає можливість реалізації безпаперової інтерактивної системи документообігу з метою більш ефективного обміну конструкторсько-технологічною інформацією в єдиних уніфікованих STEP-форматах (*ISO 10303 «Standard for Exchange of Product Model Data»*) та прототипах репозиторія даних (*MIL-STD-2549 «Configuration Management Data Interface»*). У CAD - системі, після створення креслення виконується перетворення геометричних

образів поверхонь, які підлягають обробці, в цифрові масиви з обраним кроком i з урахуванням системи формування конкретного обраного верстата. Завдяки такому поданням створюються універсальні цифрові моделі деталі і заготовки, що забезпечує можливість застосування універсальних алгоритмів в САМ-системі.

В результаті реалізації етапу попереднього аналізу напружено-деформованого стану виробу (блок 5) у змодельованих умовах експлуатації, що реалізується у таких відомих САЕ-системах, як CosmosWorks, Abaqus, SolidEdge, Catia, Unigraphics тощо, отримуємо імітаційно-аналітичні картини нормальних та тангенціальних напружень, деформацій та термодинамічного стану виробу: $\{\sigma_{o_{ij}}; \tau_{o_{ij}}; \Delta_{o_{ij}}; T_{o_{ij}}\}$. Реалізація даного етапу обумовлена необхідністю формування бази даних з оперативної аналітичної інформації для подальшого розрахунку локальних критеріїв - кваліметричних показників виробу в результаті формування макрогеометричних та залишково-деформаційних параметрів окремих поверхонь в процесі їх формоутворення [287].

Формування альтернативних варіантів структури і параметрів технологічного процесу (блок 6) в *CAPP*-системі (*Computer Aided Planning Production*) – важливий і невід’ємний етап оптимізації. Під час реалізації цього етапу формується маршрут оброблення i -ї деталі як сукупність технологічних операцій x -ї структури: $M_i = \{O_{ix}(\text{var})\}$. Кожна така операція характеризується кортежем параметрів (технологічних переходів): $O_{ix} = \{P_{ixy}(\text{var}) \forall x = \overline{1, X}\}$, що визначаються показниками: швидкості різання $V_{ixy}(\text{var})$, подачі $S_{ixy}(\text{var})$, глибини різання $t_{ixy}(\text{var})$ та параметрами інструмента $Ins_{ixy}(\text{var})$: $P_{ixy} = \{V_{ixy}(\text{var}) \wedge S_{ixy}(\text{var}) \wedge t_{ixy}(\text{var}) \wedge Ins_{ixy}(\text{var}) \forall y = \overline{1, Y}\}$. Причому формальна характеристика інструмента не обмежується геометричними показниками $\gamma_{ixy}(\text{var}), \alpha_{ixy}(\text{var}), \phi_{ixy}(\text{var})$, але включає також вибір інструментального матеріалу та типу покриття $Mins_{ixy}(\text{var})$:

$$\text{Ins}_{ixy} = \left\{ \gamma_{ixy}(\text{var}) \wedge \alpha_{ixy}(\text{var}) \wedge \phi_{ixy}(\text{var}) \wedge \text{Mins}_{ixy}(\text{var}) \forall y = \overline{1, Y} \right\}. \quad \text{Попереднє}$$

формування альтернативних варіантів структури та параметрів технологічного процесу відбувається на основі методології прототипування [79] і включає в себе ряд формальних процедур розпізнавання геометричної форми об'єкту виробництва $\{Ef_{ij}\}$ всіх $\forall j = \overline{1, J}$ поверхонь деталі, аналізу їх розмірів $\|L_{ij} \wedge D_{ij}\|$, параметрів точності та шорсткості $\{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\}$ та заданих параметрів міцності $\{HB_{ij}\}$ (див. блок 1 даного алгоритму). Найбільш наближений аналог, що є в базі даних САРР-системи, узгоджується та адаптується до вхідних даних з врахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва на основі логічних формалізованих процедур. У САРР - системі програміст-технолог в ручному режимі встановлює тільки геометричні параметри інструменту, необхідні параметри та характеристики верстата. Далі автоматично вирішується завдання оптимізації для визначення оптимальної глибини різання на чорнових проходах по критерію мінімального часу механічної обробки. Обчислення оптимальної глибини різання дозволяє визначати, попередніми моделюванням і простим порівнянням результатів, оптимальну стратегію механічної обробки, а саме, траєкторії, що забезпечують мінімум часу всього технологічного переходу. Далі включається модуль системи, який, виконуючи моделювання процесу зрізання припуску відповідно до вибраної стратегії, автоматично, на кожному кроці моделювання, вирішує задачу оптимізації і визначає параметри оптимального режиму різання в залежності від виду обробки - точіння, фрезерування або шліфування.

При цьому маршрут оброблення komponується з врахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва: його типу і організаційної форми, групи верстатів та технологічного оснащення шляхом узгодженості методів та їх послідовності при обробленні окремих поверхонь. Необхідно брати до уваги можливість забезпечення параметрів точності та якості кожної j -ї ($j = \overline{1, J}$) окремої поверхні i -ї деталі внаслідок послідовного оброблення на

верстатах різних типів, тому в розроблюваний маршрут оброблення необхідно включити відповідні операції, які визначаються типом застосовуваних верстатів.

Маршрут оброблення визначається дотриманням певної послідовності оброблення різних поверхонь (послідовності операцій), яка регламентується в першу чергу необхідністю забезпечення точності взаємного розташування та якості поверхонь. Ці вихідні дані є попередньо сформульованими САЕ-системою та узгодженими САЕ-системою у відповідності з експлуатаційними вимогами: $\{Ef_{ij}\} \cap \|L_{ij} \wedge D_{ij}\| \cap \{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\} \cap \{HB_{ij}\}$ [287].

При побудові маршруту оброблення деталі слід виходити з того, що кожен наступний метод повинен бути точнішим за попередній. Технологічний допуск на проміжний розмір, який отриманий на попередньому етапі оброблення, повинен перебувати в тих межах, при яких принципово можливе використання подальшого наміченого методу оброблення. Визначення кількості етапів оброблення (фактично – кількості технологічних переходів) проводять з використанням гіпотези про послідовне уточнення розміру поверхні заготовки економічно доцільними методами до точності розміру поверхні деталі [327].

Після оброблення заготовка отримує розрахункове уточнення, яке рівне:

$$\varepsilon_{y \text{ розр}} = \frac{T_{\text{заг}}}{T_{\text{дет}}} \quad (5.79)$$

де $T_{\text{заг}}, T_{\text{дет}}$ – відповідно допуски на розмір певної поверхні заготовки і деталі відповідно.

У загальному випадку кожна поверхня обробляється послідовно чорновими, чистовими та викінчувальними методами, тобто оброблення проходить у декілька етапів, на кожному з яких точність поверхні підвищується на величину:

$$\varepsilon_{y_i} = \frac{T_{i-1}}{T_i} \quad (5.80)$$

де T_{i-1}, T_i – відповідно допуски, що забезпечуються попереднім і поточним методами оброблення.

Допустима точність оброблення поверхні може бути забезпечена різними методами оброблення, кожний з яких має свою величину уточнення. Повністю оброблена поверхня отримує загальне уточнення, яке дорівнює добутку уточнень, отриманих на кожному переході (операції):

$$\varepsilon_{y\Sigma} = \varepsilon_{y1} \cdot \varepsilon_{y2} \cdot \varepsilon_{y3} \cdot \dots \cdot \varepsilon_{ym} = \prod_{i=1}^m \varepsilon_{yi} \quad (5.81)$$

Ознакою того, що кількість методів оброблення поверхні деталі вибрано вірно, є нерівність:

$$\varepsilon_{y\text{розр}} \leq \varepsilon_{y\Sigma} \quad (5.82)$$

Коефіцієнт уточнення визначає необхідну кількість методів оброблення m :

$$m = \frac{\lg \varepsilon_{y\text{розр}}}{0,46} \quad (5.83)$$

Кількість методів оброблення для розмірів, точність яких задана відповідним квалітетом, наведена у додатку Ж.

При виборі методів оброблення кожного x -го варіанту технологічної структури оброблення i -ї деталі: $M_i = \{O_{ix}(\text{var})\}$ необхідно виходити з того, що підвищення точності механічного оброблення на окремих етапах (переходах) технологічного процесу відбувається непропорційно: на початкових операціях точність оброблення підвищується на більшу кількість квалітетів; на викінчувальних операціях – меншу. Відповідно до цього правила, при плануванні оброблення слід враховувати максимальну точність, яку можна досягнути на поточному переході. Орієнтовні значення кількості квалітетів, на які підвищується точність при механічному обробленні (при різних співвідношеннях квалітетів точності заготовки та деталі), розраховані на та наведені у додатку Ж1, а відповідні граничні значення уточнень – у додатку Ж3.

Для кожного x -го варіанту структури технологічної операції і y -го варіанту технологічного переходу в САФ-системі імітаційно моделюється картина напружено-деформованого стану NDS_{xy} (блок 9) відповідної поверхні (в т.ч. залишкові параметри напруження I і II роду та деформації) в процесі її формоутворення:

$$NDS_{xy} = \left\{ \bar{\sigma}_{xy}; \bar{\tau}_{xy}; \sigma_{xy}^{\pm}; T_{xy}; \varepsilon_{xy}; \dot{\varepsilon}_{xy}; \beta_{xy}; \sigma_{залху}^I; \sigma_{залху}^{II}; \Delta_{xy} \right\}.$$

Детально формування результатів такого моделювання викладено в розділі 3.

На основі цих розрахунків спочатку визначають геометрико-кінематичну складову мікронерівності Δ_1 , потім вібраційну складову Δ_2 та деформаційну складову Δ_3 . Така постановка задачі дозволяє формалізувати процес формування мікронерівностей профілю як множини параметрів мікротопології поверхні : $\{R_{max}; R_{pk}; R_{vk}; R_k; \nu; t; B; K_p; K_v\} = f(\Delta_1; \Delta_2; \Delta_3)$ (блок 10). Методика такого аналізу викладена в розділі 4. При цьому важливо перевірити умову (блок 11): $\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 > Ra_{ij}$. У випадку її дотримання, слід повернутись до формування параметричних вхідних даних (в першу чергу зменшити подачу інструмента [288]:

$$S_{ix(y+1)}(\text{var}) = S_{ixy} - \Delta(S_{xy}),$$

де $\Delta(S_{xy})$ - нормативний крок зміни параметру подачі інструмента.

При моделюванні трибоконтракту параметри мікротопології поверхонь (блок 10) повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні у відповідності до моделі Демкина (див. форм. 6.22 – 6.30) – блок 13. При цьому еквівалентна несуча площа контакту залежить від навантаження на трибоспряження в ступені, що змінюється від 0,2 до 1,0, причому домінуючий вплив має саме форма мікронерівностей, а не їх висотні та крокові параметри.

На етапі розрахунку локального критерію - інтенсивності зношування функціональних поверхонь (блоки 14-32) важливим є визначення умов функціонування трибоконтракту за критерієм Грінвуда-Вільямсона (див форм.(5.8)). У відповідності до виконання умови (блок 14):

$\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 > 0,89 \cdot \mu_1 \cdot \left(\frac{H_i}{E_i} \right)^2$, розраховується показник зносостійкості

$I_{h_{xy}} = f(\mu_i, \lambda_{xy}, v_{ekv}, R \max_{ekv} E_{ekv}, b_{ekv}, tm_{ekv}, \sigma_{eII}^{\pm})$ на основі пружного (блоки 15-26) або пружно-пластичного (блоки 27-32) контакту спряжених поверхонь. Більш детально цей етап розрахунку описано в розділі 5.1.1.

Для розрахунку локального критерію - коефіцієнту запасу за показником втомної міцності n_{-1} функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь застосовують формулу Гафа і Поларда (5.49) – блок 46. Попередньо з врахуванням домінування нормальних (5.50) або крутних (5.51) напружень повинні бути розраховані такі параметри, як коефіцієнт концентрації напружень n_{eK} (блоки 33-34); коефіцієнт впливу геометричних розмірів деталі n_{eD} (блоки 35-36); коефіцієнт впливу шорсткості поверхні n_{eR} (блоки 36-37); коефіцієнт впливу залишкових деформацій, що виникли в результаті механічного оброблення деталі n_{eZ} (блоки 38-41). Коефіцієнти чутливості до асиметрії циклу навантаження ψ_{σ} і ψ_{τ} визначають за формулами (5.59) – блоки 42-43. Відтак для деталі, працюючої в умовах циклічної зміни нормальних чи дотичних напружень, обчислення коефіцієнтів запасу міцності виконують по формулах (5.57) - (5.58)– блоки 44-45.

Локальний критерій триботехнічної якості спряжень (що визначається як енергетичні втрати на тертя в спряжених поверхнях деталей машин) характеризується таким важливим показником як коефіцієнт тертя, що розраховується у блоці 47 : $F_s = f(b_{ekv}, v_{ekv}, R \max_{ekv}, tm_{ekv})$

Розрахунок локального критерію – мастильної утримуючої здатності функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь визначається коефіцієнтом запасу S рідинного трибоконтакту (блок 51). Цей

показник визначається як відношення мінімальної товщини мастильного шару h_{\min} (блок 48) і критичною мінімальною товщиною мастильного шару $h_{кр}$, що є межею переходу рухомих спряжених поверхонь з напіврідинного режиму в режим рідинного змащування (блок 49). Причому мінімальна товщина мастильного шару h_{\min} формується, виходячи не тільки з конструктивних параметрів опорних поверхонь трибоспряжень, якості мастила та динаміки роботи механізму, у склад якого входить виріб, а також з врахуванням мікротопології поверхонь спряження: $h_{\min} = f(R \max_{ekv}, Rv_{ekv})$.

Алгоритм розрахунку локального критерію корозійної стійкості функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення передбачає розрахунок параметру інтенсивності фретинг-корозійного руйнування цих поверхонь в об'ємному або лінійному еквіваленті $\tau_m = \frac{\Delta m}{v_m} \vee \tau_1 = \frac{\Delta l}{v_1}$ (блок 56). Оскільки мікроступи лінійно рухаються по поверхні металу зі швидкістю v , причому кожен з них оголяє поверхню чистого металу і проробляє борозну з усередненою глибиною $(R_p k_{ekv} + R_{k_{ekv}})$, це і є приводом для констатації факту впливу мікротопології обробленої поверхні на явища корозійного руйнування (див розд.5.1.3). Причому процес руйнівного окислення відповідає логарифмічному закону Г.Уліга [307] – блок 55.

Підпрограма призначення евристичних коефіцієнтів ваги: $\{\alpha_n \forall n=1,5\}$ (блоки 57-62) детально описана в розділі 5.2 і передбачає також розрахунок нормалізованих локальних критеріїв оптимізації (блоки 63-68) за показником зносостійкості Q_1 ; за коефіцієнтом запасу втомної міцності Q_2 ; за параметром триботехнічної якості спряжень Q_3 ; за параметром корозійної стійкості Q_4 ; за коефіцієнтом запасу рідинного трибоконтракту Q_5 . Остаточню узагальнений критерій оптимізації F_{xy} (блок 69), визначається за формулою (5.78).

Алгоритм направлено пошуку альтернативних параметрів у-го технологічного переходу x -ї операції [288]:

$$P_{ix(y+1)} = \{V_{ix(y+1)}(var); S_{ix(y+1)}(var); t_{ix(y+1)}(var); Ins_{ix(y+1)}(var)\} \quad (\text{блок } 74) \quad \text{та}$$

генерування альтернативних варіантів структури технологічного процесу:

$$M_{i(x+1)y} = \{O_{i(x+1)y}(var)\} \quad (\text{блок } 77) \quad \text{відбувається за евристичними правилами більш}$$

детально показана на Рис.5.4 і виконується у такій спосіб [287, 288]:

1. Вибрану згідно результатів роботи САРР-системи (блок 4) подачу коректують спочатку в напрямку зростання: $S_{ix(y+1)}(var) = S_{ixy} + \Delta S_{ixy}$ (блок 6). Якщо розрахований (блок 11) узагальнений критерій оптимізації зменшується ($F_{x(y+1)} < F_{xy}$), то подачу коректують в напрямку зменшення: $S_{ix(y+1)}(var) = S_{ixy} - \Delta S_{ixy}$. Це відбувається шляхом присвоєння кроку ΔS_{ixy} негативного значення (блок 16). Причому виконання цих ітерацій виконують до тих пір, поки значення критерію $F_{x(y+1)}$ не буде оптимізоване (стане максимальним), або подача не вийде за межі нижченаведених умов 2,3 або 4 даного алгоритму.

2. При цьому слід обмежувати подачу величиною, що допускається міцністю різального інструменту S_{pi} (блок 8). Наприклад, для точіння [89]:

$$S_{ix(y+1)} \leq S_{pi} = \sqrt[x_{pz}]{\frac{B^2 \cdot H [\sigma_i]}{6 \cdot c_{pz} \cdot l \cdot t^{y_{pz}}}} \quad (5.84)$$

де l - виліт різця (в даному випадку може бути розрахований як $l = (1 \dots 1,5) H$);

$[\sigma_i]$ - допустиме напруження на згин матеріалу державки різця;

x_{pz} , y_{pz} , c_{pz} - величини, що залежать від властивостей оброблюваного матеріалу і геометрії ріжучого інструменту, виду охолодження [89];

B і H - ширина і висота державки інструменту відповідно.

3. Крім того, необхідно обмежувати подачу величиною, що допускається жорсткістю заготовки $S_{жз}$ (блок 9) для забезпечення нормативного значення допуску геометричної форми [89]:

$$S_{ix(y+1)} \leq S_{жз} = \sqrt[x_{pz}]{\frac{\varepsilon_i \cdot J_i \cdot E_i \cdot [W_{ij}]}{1,1 \cdot c_{pz} \cdot l^3 \cdot t^{y_{pz}}}} \quad (5.85)$$

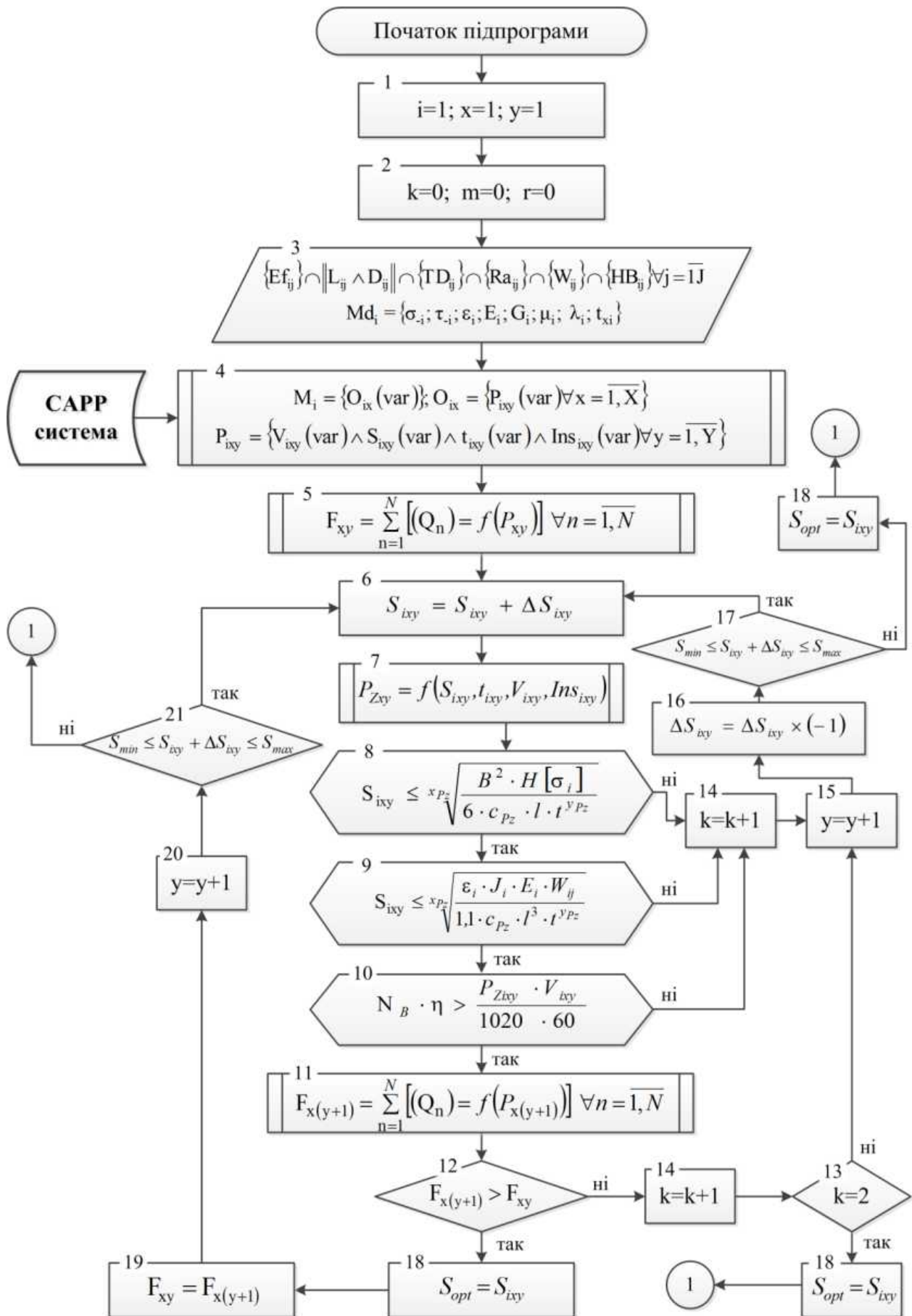


Рис.5.4. Блок-схема алгоритму направлено пошуку альтернативних та оптимальних параметрів у-го технологічного переходу x-ї операції [288]

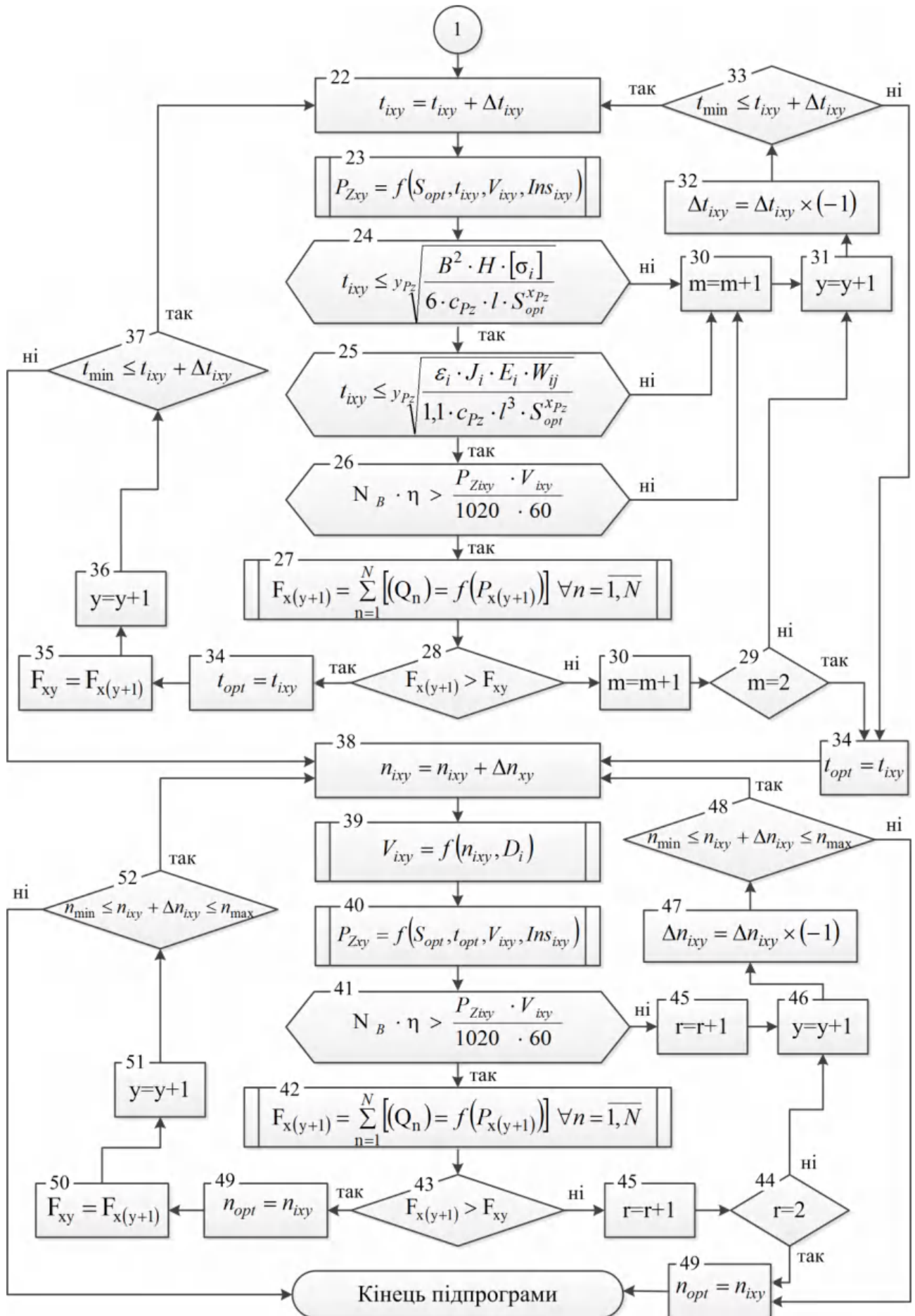


Рис.5.4. (продовження)

де $[W_{ij}]$ – допустиме відхилення форми j -ї поверхні i -ї деталі;

E_i - модуль пружності матеріалу оброблюваної заготовки;

J_i - момент інерції перерізу заготовки (для круглих суцільних деталей $J = 0,05d^4$, де d - діаметр заготовки);

l - відстань між точками закріплення заготовки або виліт деталі при кріпленні її тільки в патроні;

ε_i - коефіцієнт жорсткості, залежить від способу закріплення заготовки на верстаті.

4. Важливою умовою можливості реалізації процесу механічного оброблення є обмеження потужності різання N_e параметром потужності головного привода вибраного САРР-системою верстата N_B з врахуванням його ККД (η):

$$N_B \cdot \eta > N_e = \frac{P_z \cdot V_{ixy}}{1020 \cdot 60} \quad (5.86)$$

де $P_z = f(S_{ixy}; t_{ixy}; \{INS\}_{ixy}; HB_i; \sigma_i)$ - сила різання, що визначається імітаційно САФ-системою (блок 7).

5. З метою уникнення безперервної циклічності алгоритму та зменшенні логічно не обґрунтованих розрахунків, у розрахунок вводять т. зв. «плаваючий лічильник неефективних ітерацій», який в початкових умовах приймається рівним 0 (блок 2) (для розрахунку оптимальної подачі цей лічильник позначають k , для розрахунку глибини різання – m , а для швидкості різання – r). Якщо зростання оптимізованих параметрів не збільшує критерій оптимальності $F_{x(y+1)}$, то значення лічильника ітерацій збільшують на 1 (блоки 14,30 та 45) а приростам параметрів (ΔS_{ixy} , Δt_{ixy} , Δn_{ixy}) присвоюють негативні значення (блоки 16, 32 та 47). Це ж повторюється і у випадку недотримання умов 2,3 та 7 даного алгоритму (блоки 8, 9,10, 24, 25, 26,41). Якщо ж і зменшення оптимізованих параметрів не призводить до позитивного результату (зростання критерію оптимальності $F_{x(y+1)}$), то лічильник ітерацій збільшують ще на 1 і у відповідності до умов (блоки 13, 29 та 44), цикл оптимізації даного

параметру переривають (констатуючи на цьому етапі його оптимальне значення (блоки 18, 34, 49)) і переходять до оптимізації наступного параметру.

6. Глибину різання коректують аналогічно подачі шляхом початкового зростання попередньо визначеного значення t_{ixy} на крок Δt_{ixy} : $t_{ix(y+1)}(\text{var}) = t_{ixy} + \Delta t_{ixy}$ (блок 22) Якщо ж узагальнений критерій оптимізації зменшується ($F_{x(y+1)} < F_{xy}$) (негативне значення умови - блок 28), то глибину різання зменшують: $t_{ix(y+1)}(\text{var}) = t_{ixy} - \Delta t_{ixy}$ (блоки 32 і 22) до тих пір, поки значення критерію $F_{x(y+1)}$ не стане максимальним, або глибина різання не вийде за межі попередніх умов 2,3 або 4 даного алгоритму (блоки 24, 25, 26).

7. Вибрану згідно результатів роботи САРР системи (блок 6) швидкість різання аналогічно коректують спочатку в напрямку її зростання: $V_{ix(y+1)}(\text{var}) = V_{ixy} + \Delta V_{ixy}$. Якщо узагальнений критерій оптимізації зменшується ($F_{x(y+1)} < F_{xy}$) (блок 43), то швидкість коректують в напрямку зменшення: $V_{ix(y+1)}(\text{var}) = V_{ixy} - \Delta V_{ixy}$. Ці процедури, як і у випадку корекції подачі, виконують до тих пір, поки значення критерію $F_{x(y+1)}$ не буде найвищим, або швидкість різання не вийде за межі умови 4 (блок 41) [288].

Приклад практичного використання даних алгоритмів наведений в розділі 6.

Висновки до розділу 5.

1. Функцією мети при виборі оптимальної структури та параметрів технологічних операцій і переходів функціонально-орієнтованого технологічного процесу є інтегральний кваліметричний показник, який системно характеризує комплекс експлуатаційних властивостей найбільш навантажених поверхонь виробу. Реалізація цих властивостей є наслідками формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару функціонально-важливих поверхонь виробів, залишкових напружень та деформацій. Найбільш важливі характеристики функціональної ефективності певної j -ї поверхні i -ї деталі $\{F_i\}$ слід оцінювати локальними критеріями: зносостійкості (q_{ij1}); триботехнічної якості спряжень (q_{ij2}); втомної міцності (q_{ij3}); корозійної стійкості (q_{ij4}); мастильної утримуючої здатності (q_{ij5}); властивості оптичного віддзеркалення (q_{ij6}); властивості теплового віддзеркалення (q_{ij7}); властивості забезпечення герметичності з'єднань (q_{ij8}) тощо.

2. Традиційно контрольовані параметри шорсткості поверхні Ra і Rz не дають повної оцінки експлуатаційних властивостей виробу, оскільки не відображають форму мікрорельєфу, що є надзвичайно важливим для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей їх функціональних поверхонь. Таким чином, важливим етапом розробленого в дисертаційній роботі методу функціонально-орієнтованого технологічного проектування є моделювання та формалізація параметрів, що характеризують форму мікрогеометрії поверхні: усередненої висоти виступів (R_{pk} - верхньої частини профілю, що в першу чергу руйнується в процесі припрацювання виробу); глибини нерівностей профілю поверхні (R_k - параметра, що має визначальний вплив на термін служби і якісні показники роботи виробу); усередненої глибини западин профілю (R_{vk} - визначає мастилоутримуючу властивість функціональної поверхні). Таким чином, криві опорних поверхонь мають значення для розрахунків контактних напружень та деформацій,

характеризують потенційні трибомеханічні та мастилоутримуючі параметри з'єднання.

3. Можливість прогнозувати певну величину зносостійкості при заданні характеристик якості поверхневого шару, що забезпечуються оптимальними методами оброблення, дозволяє підвищити експлуатаційні властивості виробу у відповідності до концепції PLM. Проте вирішення цієї проблеми багато в чому ускладнене з наступних причин: складність адекватної формалізації математичних моделей, що пов'язують показники зносостійкості з характеристиками якості поверхні і технологічними умовами оброблення, різноплановість підходів до опису фізики процесів зношування, розрізненість і суперечність відомостей по забезпеченню зносостійкості, використання різнопланових критеріїв при виборі умов зношування, матеріалів, характеристик якості поверхні, методів оброблення та ін. Враховуючи це, першочерговим завданням в умовах конструкторсько-технологічного забезпечення зносостійкості деталей повинна стати систематизація даних (інформації) про математичну модель процесу зношування і побудова на її основі сучасного методу проектування структури та параметрів функціонально-орієнтованих технологічних процесів з використанням обчислювальної техніки.

4. Фактична площа контакту у трибоспряженнях має суттєвий вплив на такі важливі кваліметричні властивості, як теплопровідність, електричний опір реальних спряжень, контактну міцність, корозійну стійкість тощо. Оскільки фактичний контакт майже на 2 порядку менше номінального при моделюванні еквівалентної поверхні мікрогеометричні параметри поверхонь повинні бути змінені у відповідності до моделі Демкина. Таким чином можна апроксимувати контурну площу спряжених поверхонь до вигляду контакту шорсткої поверхні з віртуальними показниками b_{ekv} і $V_{Декv}$ і умовним радіусом закруглення мікрогеометричної поверхні r_{ekv} з абсолютно гладкою поверхнею. Очевидно, що кожен мікровиступ деформується спочатку пружно, а потім пружно-пластично. Основним критерієм переходу від пружного контакту до пластичного в даній дисертаційній роботі прийнято критерій Вільямсона-

Грінвуда, або т.зв. індекс пластичності. При цьому вважається, що пластична текучість мікронерівності починається тоді, коли максимальний Герців тиск q_{max} досягає значення $0,6H$ (H – твердість найбільш м'якого з контактуючих матеріалів). У відповідності до виконання умови потенційної пружності або

пластичності трибоконтракту $\left(\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 > 0,89 \cdot \mu_i \cdot \left(\frac{H_i}{E_i} \right)^2 \right)$, запропоновано

алгоритм розрахунку показника інтенсивності зношування

$I_{h_{xy}} = f(v_{ekv}, R_{max_{ekv}}, E_{ekv}, b_{ekv}, tm_{ekv}, \sigma_{зал}^{\pm})$. Таким чином буде встановлений

формалізований взаємозв'язок між технологічними складовими параметра зносостійкості і показниками мікротопології поверхні та їх залишковим напружено-деформованим станом.

5. Мікронерівності, які є результатом механічного оброблення поверхні, є джерелами концентрації напружень, що істотно впливають на показники втомної міцності. В результаті оброблення різанням на поверхні деталі утворюється зона залишкової деформації і виникають залишкові напруження. Наклеп поверхні і залишкові напруження стиску підвищують втомний опір, а залишкові розтягувальні напруження, навпаки, істотно знижують межу витривалості виробу. Особливе значення має величина залишкових напружень II роду, що виникає внаслідок структурно-фазових перетворень, математична модель виникнення та формалізованої оцінки яких наведена в дисертаційній роботі. Крім того, із зростанням шорсткості оброблення поверхні також відбувається зниження меж витривалості. Причому ця тенденція тим сильніше проявляється, чим вища межа міцності оброблюваного матеріалу та вищий ступінь структурно-фазової неоднорідності матеріалу заготовки. Зниження межі витривалості оцінюють коефіцієнтами впливу якості оброблення поверхні на величину меж витривалості - σ_{-1} , τ_{-1} при згині і крученні, відповідно. В дисертаційній роботі наведений алгоритм визначення коефіцієнту запасу за показником втомної міцності функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів

функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь.

6. Експлуатаційні характеристики деталей машин і механізмів визначаються в основному, властивостями поверхневих шарів деталі, оскільки усі процеси руйнування, особливо при циклічному навантаженні починаються, як правило, з поверхні і залежать від її будови і фізико-хімічного стану. Роль характеру недосконалості функціональної поверхні істотно зростає при корозійній втомі, оскільки вона спричинює руйнування захисних бар'єрних плівок, що знижують швидкість корозії за відсутності напружень, а також концентрацією специфічного виду напружень, що спричинюються пошкодженнями в результаті виникнення на поверхні корозійних каверн. Щодо корозійної стійкості оброблених поверхонь деталей, на основі аналізу реологічного моделювання технологічних переходів, можна зробити такі висновки:

- в результаті збільшення швидкості різання (більше 150 м/хв) та зменшення подачі (менше 0,1 мм), питома величина деформаційної складової мікронерівності збільшується, що сприяє утворенню мікрорельєфу з значними значеннями глибини мікровпадин Rvk , що спричинює зменшення концентрації оксидних продуктів на функціональній поверхні деталі, в результаті чого корозійна стійкість підвищується;
- підвищенню корозійної стійкості механічно-оброблених поверхонь деталей сприятиме ефект вибіркового переносу матеріалу спряжених поверхонь як результат самовільного утворення в зоні контакту пасивованої (без окислів) тонкої плівки з низьким опором зсуву, не здатної наклепуватись при терті, що може багаторазово деформуватись без руйнування. При цьому продукти зношування переходять з одної спряженої поверхню на іншу і утримуються в зоні трибоконтракту;

- з іншої сторони, неоднорідний характер пластичної деформації в зоні різання, призводить до різниці потенціалів між неоднаково-деформованими кристалами, тобто до утворення маси гальванічних пар, що є причиною зменшення корозійної стійкості оброблюваного матеріалу заготовки.

7. Технологічні методи підвищення надійності та довговічності функціонування рухомих трибоз'єднань забезпечується шляхом створення плосковершинного маслоутримуючого рельєфу функціональних поверхонь виробу з мастильними мікрозападинами на спряжених поверхнях виробів. Так, одним з найважливіших критеріїв працездатності рухомих з'єднань є дотримання режиму рідинного тертя між спряженими поверхнями деталей шляхом створення мінімальної товщини мастильної плівки в зоні їх трибоконтракту. У загальному випадку товщина шару включає в себе: величину мікро- та макронерівностей спряжених деталей в зоні трибоконтракту; складові величини, що враховують в нормальному напрямку відхилення від взаємного розташування спряжених поверхонь по довжині трибоконтракту; сумарні значення пружно-пластичних деформацій спряжених поверхонь деталей в зоні трибоконтракту. Проте, найбільшим резервом забезпечення стійкості та достатності об'єму масляного проміжку залишається величина усередненої глибини западин профілю R_{vk} , що визначають змащувальну здатність поверхні. Саме цей показник формалізує залежність якості мастильної утримуючої здатності трибоспряження від структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

9. Наявність єдиного комплексного критерію $K(F_i)$ технічного рівня виробу визначає необхідність розроблення методики та алгоритму вирішення багатокритерійної оцінки якості виробу. Найбільш ефективним інструментарієм можна вважати метод звертання множини показників в єдиний, еквівалентний за умовами комутативності та безперервної диференціації в просторі показників $\{F_i\}$ по всіх показниках функціональної ефективності $\{q_{ijn} | \forall n = \overline{1, N}\}$ кожної j -ї

поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі. В даному випадку параметричною формою оператора зертання можна вважати адитивну нормувальну форму виду

$$K(F_i) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot q_n \neq 0 \forall n = \overline{1, N}.$$

8. Розроблений в дисертаційній роботі алгоритм структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу складається з таких етапів: етап інтерактивного внесення інформації (вхідних даних) в систему; етап моделювання виробу, його попереднього інженерного аналізу та формування вихідного варіанту структури і параметрів технологічного процесу; етап моделювання та аналізу напружено-деформованого стану виробу в процесі його формоутворення, реалізований в САФ-системі; етап розрахунку локальних критеріїв - інтенсивності зношування функціональних поверхонь в умовах потенційного функціонування виробу в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь; коефіцієнту запасу за показником втомної міцності функціональних поверхонь деталі; показника залежності динамічної якості трибоспряжень функціонально-важливих поверхонь деталі; коефіцієнту запасу рідинного трибоконтракту функціональних поверхонь деталі в імовірних умовах їх функціонування; параметру залежності корозійної стійкості (фретінг-корозії) поверхонь деталі в умовах потенційного функціонування виробу від структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь; етап інтерактивного лінійного нормування кваліметричних критеріїв та поточного розрахунку функції мети вибраного структурно-параметричного варіанту функціонально-орієнтованого технологічного процесу; етап направлено пошуку альтернативних варіантів структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу за евристичними правилами; етап формалізації результатів структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу за системним кваліметричним критерієм.

РОЗДІЛ 6.

УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПРИКЛАД ФОРМУВАННЯ ТА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

В попередніх розділах дисертаційної роботи було доведено, що системний підхід до технологічного забезпечення працездатності деталей базується, з одного боку, на оцінці показників якості деталей, що характеризують їх геометричну форму, мікротопологію поверхневого шару та його фізико-механічні властивості (в т.ч. залишкові) залежно від технологічних чинників і, з іншого боку, на прогнозуванні експлуатаційних властивостей (зносоустійкості, контактної жорсткості, корозійної стійкості тощо) деталей залежно від їх показників якості. Очевидно, що забезпечення лише окремих локальних показників якості виробів не гарантуватиме оптимальні експлуатаційні властивості виробу в цілому, натомість необхідно проектувати функціонально-орієнтований технологічний процес, що базується на аналізі сукупності взаємопов'язаних експлуатаційних показників виробу.

Для забезпечення якості прецизійних деталей та таких, що підлягають значним силовим або триботехнічним навантаженням, температурному або хімічному впливу зовнішнього середовища, необхідно враховувати дві складові чинників формування експлуатаційних властивостей: перша характерна безпосередньо для процесу оброблення, друга має спадкову природу, тобто визначається попередніми процесами. Друга складова стійка і лише в деякій мірі підлягає як ліквідації, так і зменшенню. Якщо при виготовленні деталей нормальної точності спадкова складова є дуже малою частиною допуску показника, то при виготовленні прецизійних деталей вона формує його основну частину, а в деяких випадках і перевершує допуск.

6.1. Вихідні дані на проектування

В сучасному машинобудуванні особливу складність представляє виготовлення різних деталей штампів і прес-форм та ін. Це обумовлено їх високою точністю, низькою шорсткістю функціональних поверхонь, значними температурними флуктаціями в процесі експлуатації (до 500-700°C), складним (з точки зору його оброблюваності) матеріалом цих деталей, високою частотою та інтенсивністю циклічних та знакозмінних термічних та силових навантажень тощо. Прес-форми дуже різноманітні по конструкції формотвірних порожнин. У прес-формах для металевих і неметалевих виробів формотворна порожнина може розташовуватися тільки в матриці (у рухомій частині), тільки в пуансоні (у нерухомій частині) або в пуансоні і в матриці (тобто в обох частинах прес-форми). Крім того, конструкції прес-форм відрізняються і за способом видалення сформованого виробу. Так, для прес-форм литва під тиском використовуються конструкції із стержневими або трубчастими виштовхувачами, з плитою роз'єму і з автоматичним вигвинчуванням виробу. На Рис.6.1 наводиться фрагмент конструкції прес-форми для виготовлення заготовки кришки батареї¹. Матеріал цієї кришки – алюмінієвий сплав АК9 (ГОСТ 1583-93).

Особливу увагу при експлуатації прес-форм приділяють виштовхувачам. Відповідно до наведеної в [72, 76, 262] статистики відмов функціональних деталей та вузлів прес-форм, на систему видалення заготовок припадає 25-30% всіх збоїв при роботі та поломок цих виробів. Це викликано складними високочастотними термодинамічними умовами експлуатації виштовхувачів, проблемами охолодження у поєднанні з їх нежорсткою конструкцією (співвідношення довжини до діаметра в межах 15-20), вимогами надщільної герметичності рухомого з'єднання, зносостійкості, втомної міцності та високої якості виготовлення (точність розмірів – 5-7 квалітет, параметр шорсткості функціональних поверхонь – 0,2-0,8 мкм тощо).

¹ Конструкція прес-форми розроблена ас. Бойко М. (Національний університет «Львівська політехніка») і наводиться з його дозволу.

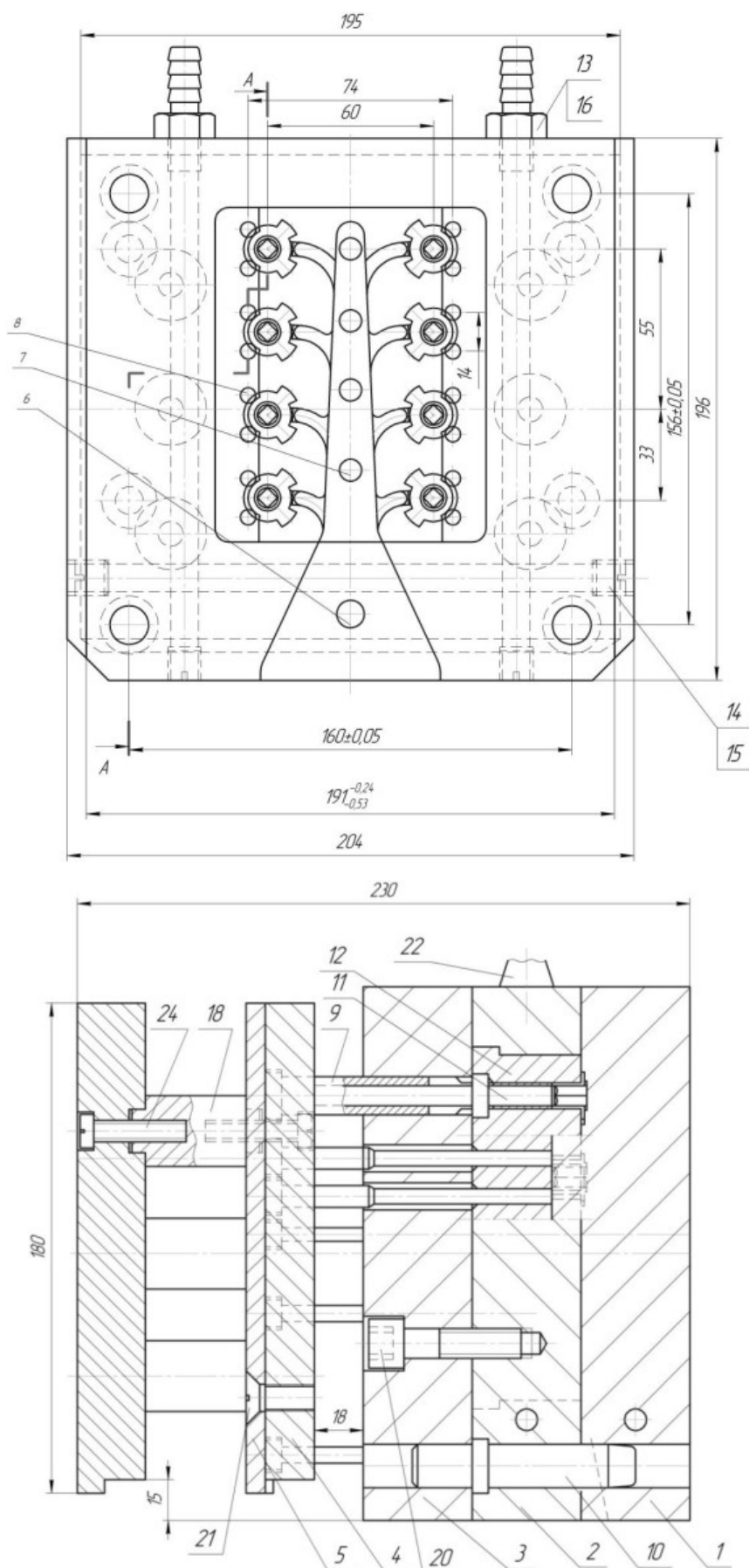


Рис.6.1. Фрагмент конструкції прес-форми для виготовлення заготовки кришки батареї

На робочій поверхні прес-форми вкладиші з виштовхувачами утворюють стик, який може змінитися. В цей проміжок затікає рідкий метал, утворюючи облой-заток на поверхні вилівка. Тому проміжок між виштовхувачем і отвором у вкладиші виконують в межах 0,08-0,1 мм. Проміжок має бути максимально допустимий, він залежить від використання матеріалів для виготовлення вкладишів і виштовхувачів, матеріалу вилівка, температури заливки, температури підігрівання прес-форм, швидкості потоку рідкого металу, питомого тиску на стінки робочої порожнини і інших чинників [222].

Виштовхувачі, виготовлені із сталей У10А і У12А, придатні лише при виробництві вилівок з цинкових і магнієвих сплавів і абсолютно непридатні при виготовленні вилівок із сплавів на основі алюмінію. Тому в наведеному прикладі виштовхувачі виготовляють з високолегованої низьковуглецевої сталі 3Х2В8Ф (ГОСТ 5950-90)². Хімічний склад цієї сталі – С - 0,3 - 0,4%; Si - 0,15 - 0,4%; Mn - 0,15 - 0,4%; Ni - до 0,35%; S - до 0,03%; P - до 0,03%; Cr - 2,2 - 2,7%; Мо - до 0,5%; W - 7,5 - 8,5%; V - 0,2 - 0,5%; Cu - до 0,03%; Fe - ~87%. Твердість матеріалу: HB 10¹ = 241 МПа. Оброблюваність різанням: при HB 200-220 і $\sigma_B=710$ МПа, $K_{\text{ув.спл}}=0,9$.

На Рис.6.2 наводяться приклади конструкцій виштовхувачів для прес-форми. При експлуатації саме цей елемент конструкції підлягає інтенсивному зношуванню і знакозмінним силовим та термічним навантаженням, які у поєднанні здатні спричинити втрату функціональності прес-форми в цілому. Тому найбільш важливими експлуатаційними властивостями виштовхувачів є зносостійкість, контактна жорсткість, втомна міцність та корозійна стійкість (запобігання корозійному мікророзтріскуванню). Перелічені вище експлуатаційні властивості істотно залежать від таких показників якості поверхні, як мікротопологія функціональних поверхонь, мікротвердість (твердість поверхневого шару), залишкові напруження та деформації, їх характер та глибина залягання.

² Аналог – H21T20821 (США), 30WCrV17-2 (Німеччина), SKD5 (Японія)

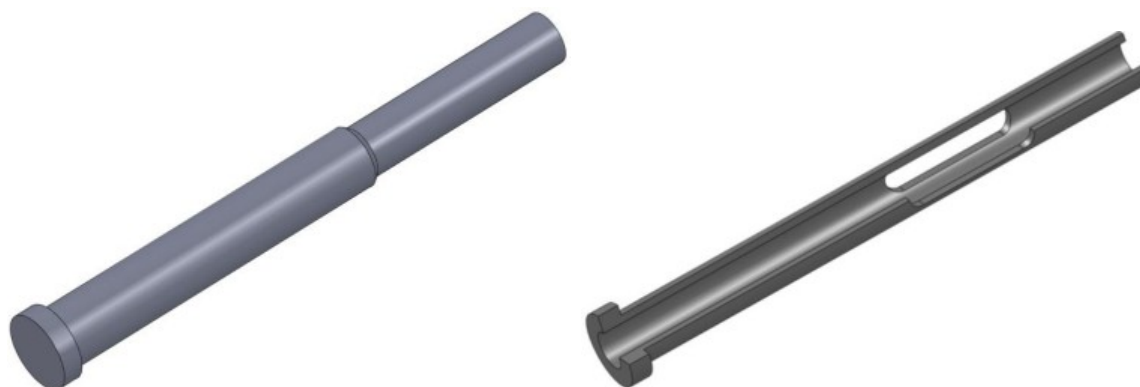
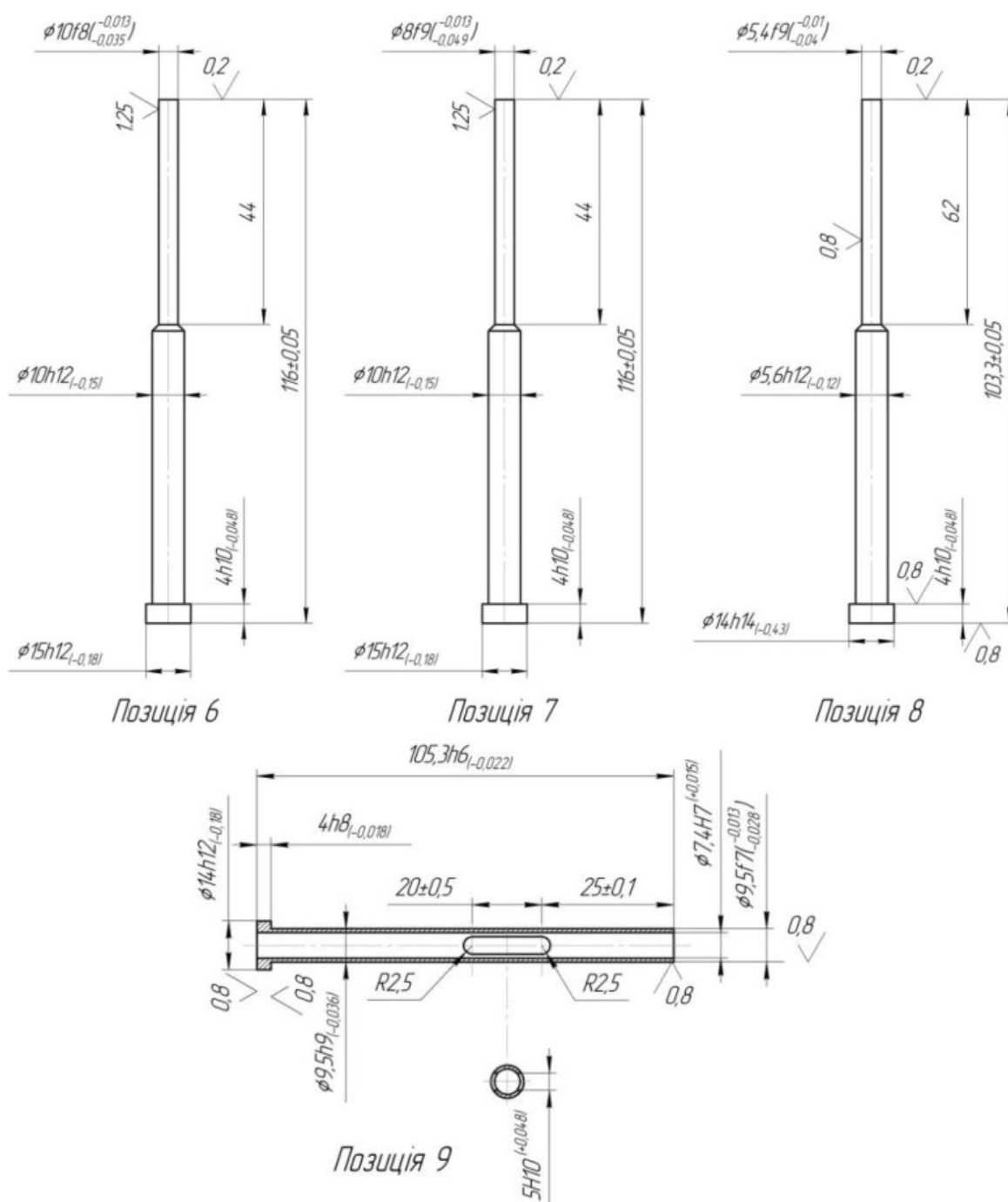


Рис.6.2. Приклади конструкцій виштовхувачів для прес-форми
(матеріал - сталь 3Х2В8Ф (ГОСТ 5950-90))

Показники якості робочої поверхні формуються, в основному, на завершальній стадії процесу виготовлення виштовхувача, що включає чистове точіння і алмазне вигладжування фасонного профілю. Це пов'язано з тим, що в базовому технологічному процесі передбачено об'ємне гартування, яке викликає істотні деформації заготовки, і це зумовлює дуже великі (до 2 мм) припуски на чистове оброблення профілю. Саме завершальна стадія виготовлення виштовхувача детально досліджена в даному прикладі. Причому передбачити формування необхідних значень показників якості доцільно вже на етапі технологічної підготовки виробництва. Принципи функціонально-орієнтованого технологічного формування показників якості виробу спрямовані на те, щоб при заданих значеннях показників якості готової деталі, відомому діапазоні значень показників початкової заготовки і з урахуванням інформації про їх трансформацію, технологічну спадковість і взаємний вплив в процесі формоутворення функціональних поверхонь розробити найбільш ефективний маршрутно-операційний технологічний процес для забезпечення оптимального поєднання показників якості виробу.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес формування проектних технологічних рішень рівня маршрутно-операційної технології виготовлення деталей. Запропонована модель процесу формування показників якості, структура якої побудована на основі функціональних зв'язків між показниками якості в процесі виготовлення виштовхувача прес-форми. В результаті моделювання можна, задаючи структуру та параметри технологічної системи, зокрема параметри режимів оброблення, розраховувати величини показників якості деталі на певних етапах оброблення, а також визначати такі діапазони значень параметрів, які забезпечують необхідні значення показників якості деталі. Таке багаторівневе моделювання, що включає розробку структурної, математичної і комп'ютерної моделей, добре вбудовується в методику розробки функціонально-орієнтованого технологічного процесу для виготовлення прецизійних деталей, сприяючи точнішому прогнозуванню отримуваних показників якості виробів.

Розглянемо реалізацію 2-х варіантів маршруту оброблення найбільш точних

циліндричних поверхонь виштовхувачів на викінчувальній операції.

1-й варіант. Викінчувальне шліфування абразивним кругом.

2-й варіант. Тонке точіння лезовим інструментом з пластинкою з керамічного композиту на основі полікристалічного кубічного нітриду бору (60% CBN) (запропоновано використання пластини від компанії Sandvik Coromant з геометрією Wiper марки CB7025 з керамічною зв'язкою).

Полікристалічний кубічний нітрид бору (CBN) володіє особливою твердістю в умовах високих термодинамічних напружень, що дозволяє використовувати його при обробленні загартованих поверхонь деталей твердістю до 65 HRC. Він також характеризується хорошою міцністю і термостійкістю.

Сучасні матеріали CBN являють собою керамічні композити з вмістом CBN порядку 40-65%. Керамічна зв'язка додає кубічного нітриду бору зносостійкості, без чого цей матеріал був би схильний хімічним зносу. При твердості оброблюваного матеріалу більше 55 HRC пластини з CBN стають єдиною можливим рішенням, здатним замінити традиційно використовувані методи шліфування. У більш м'якої сталі (твердістю нижче 45 HRC) міститься більше ферта, негативно впливає на зносостійкість CBN [214].

Для оброблення виштовхувачів на викінчувальній операції використовуються пластини с вставками з CBN марки CB7025 компанії Sandvik Coromant [154]. Композиційний сплав CB7025 являє собою матеріал, що містить 60% CBN з бімодальним розподілом зерен (1 і 3 мкм) в керамічній зв'язці. Висока стійкість до руйнування робить його універсальним сплавом для твердого точіння. При лезовому обробленні запропоновано використання пластини Wiper від Sandvik Coromant з геометрією типу WH. На відміну від пластин типу Xcel, такі пластини мають вершини, що представляють собою комбінацію декількох різних радіусів, що зниженню шорсткості обробленої поверхні при заданих режимах різання. Кріплення iLock забезпечує надзвичайно високу надійність закріплення і стабільність позиціонування ріжучої пластини в гнізді державки. Система CoroTurn® TR виключає мікропереміщення пластини, які можуть відбуватися при профільній обробці через дії змінних різноспрямованих сил різання, викликаних зміною

траєкторії переміщення інструменту [154].

При шліфуванні функціональних поверхонь прецизійних деталей виникають проблеми, що в умовах подальшої експлуатації негативно впливатимуть на функціонування виробу. По-перше, прогріваючись в процесі абразивного оброблення, метал в тонких поверхневих шарах проходить специфічну термообробку, в результаті якої відбуваються структурні перетворення і виникають припали. При цьому порушується однорідність структури, сталість твердості, на поверхні з'являється залишкове розтягувальне напруження, що негативно позначається на зносостійкості і контактній міцності загартованих деталей. По-друге, у зв'язку з великими швидкостями нагріву і охолодження, що виникають внаслідок значних перепадів температур по перерізу деталі і в часі, в поверхневих тонких шарах металу можуть знаходитися такі поточні і залишкові напруження розтягу (зсуву), які у разі перевищення межі міцності металу призводять до утворення мікротріщин і, як наслідок, різкого зменшення довговічності деталей.

Крім того, в процесі шліфування навколо вершин контактуючих абразивних зерен виникає зона пружно-пластичних деформацій металу. Робота кожного зерна складається з роботи пружних і пластичних деформацій, сил тертя і диспергування. Відомо [102], що при шліфуванні частка роботи, що переходить в теплоту, складає 88...97% загальної роботи різання. Іншими словами, в зоні контакту кожного зерна з металом виникає локальне теплове джерело. Кожне таке джерело залишає на поверхні контакту невелику, але цілком визначену ділянку, яка зміщується по поверхні із швидкістю обертання круга. При цьому відбувається інтерференція теплових імпульсів окремих джерел, створюючи загальний потік тепла з невеликими флуктаціями, не перевищуючи 10% від середньої температури зони контакту [102].

Ефективність застосування композиційних інструментів з CNB на керамічній зв'язці, обумовлена передусім низьким коефіцієнтом тертя різця з оброблюваним матеріалом, що згідно з формулою проф. Заворикіна К.А., призводить до збільшення умовного кута зсуву ϕ матеріалу [215]:

$$\phi = 45^\circ + \frac{(\gamma - \psi)}{2} \quad (6.1)$$

де γ – передній кут різального клина;

ψ – умовний кут тертя стружки з передньою поверхнею інструменту ($\psi = \arctg(f)$).

Це створює об'єктивні передумови зниження силової і теплової напруженості процесу різання, оскільки енергоємність оброблення (умовне напруження різання) $\bar{\sigma}$ пов'язане з кутом ϕ залежністю [215]:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{стиск}}{\tg(\phi)} \quad (6.2)$$

де $\sigma_{стиск}$ – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, МПа.

До особливостей використання інструменту з CNB на керамічній зв'язці, окрім низького коефіцієнта тертя з більшістю матеріалами, слід ще віднести і малий радіус заокруглення різального леза. Це забезпечує, у поєднанні з низьким коефіцієнтом тертя, малу деформацію зрізуваного шару і обробленої поверхні, що наближає процес оброблення інструментом з CNB на керамічній зв'язці до умов чистого зрізу. Мала деформація при високій теплопровідності інструменту з CNB не сприяють розвитку високих температур в зоні різання [214]. Низький рівень температур дозволяє здійснювати обробку, яка характеризується відсутністю температурних перетворень в обробленій поверхні, максимально зберігаючи структуру основи, що є дуже важливим для забезпечення параметра втомної міцності. Відсутність температурного впливу на оброблену поверхню дозволяє понизити і вплив швидкості різання на якість оброблення і отримувати лезовим інструментом такі показники якості, які раніше забезпечувало абразивне оброблення і навіть перевершити їх. При цьому оброблення інструментом з CNB на керамічній зв'язці дозволяє забезпечити шорсткість обробленої поверхні $Ra \approx 0,1$ мкм [140].

Таким чином, традиційні методи фінішного абразивного оброблення супроводжуються тепловими та залишково-деформаційними явищами, що призводять до структурних перетворень і до зниження якості робочих поверхонь

оброблених деталей прес-форм, зокрема виштовхувачів. Тому впровадження в якості фінішного оброблення точіння інструментами з CNB, яке не викликає таких несприятливих наслідків, спрямовано на підвищення ресурсу і надійності цих виробів. Теоретичне та імітаційно-аналітичне обґрунтування доцільності та ефективності зміни структури та параметрів викінчувальної операції оброблення, виходячи з принципів функціонально-орієнтованої методології технологічного проектування, подано нижче.

6.2. Імітаційно-аналітичний аналіз впливу технологічних чинників на напружено-деформований та структурно-фазовий стан функціональних поверхонь деталей прес-форм

Для визначення основних критеріїв ефективності функціонально-орієнтованого технологічного процесу оброблення вищенаведених виштовхувачів прес-форми, необхідно проаналізувати механізми формування параметрів зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійкості тощо. Для цього в САF-системі побудуємо імітаційну реологічну модель формоутворення основних функціональних поверхонь виштовхувачів та визначимо показники напружено-деформованого стану (в т.ч. залишкові), параметри мікротопології поверхні та його структурно-фазового стану в результаті різання.

Рекомендовані [96] геометричні параметри заточування для різців з CNB на керамічній зв'язці марки СВ7025 – за класифікацією [154] C H G A 12 T3 05 A 10 15 R E WH – форма пластини – трикутна; клас допуску – G; діаметр вписаного кола 12 мм, товщина пластини 3,97 мм; геометрія Wiper типу WH; $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $r = 0,5$ мм.

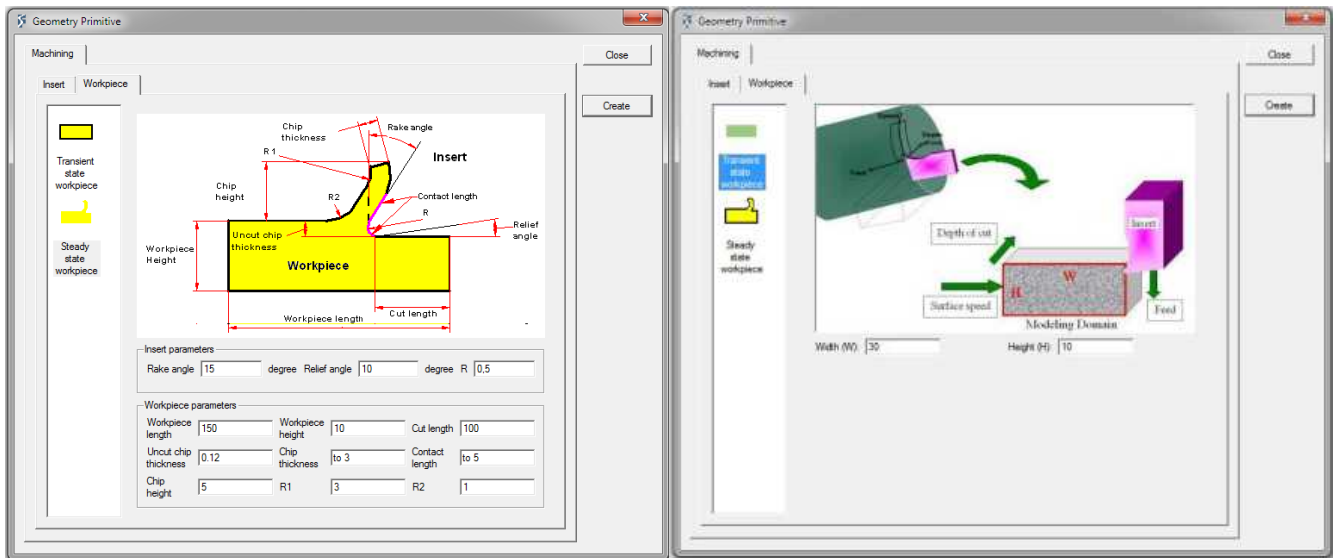


Рис.6.3. Формування геометричних примітивів різального інструменту та заготовки в системі Deform 2D

В моделі, реалізованій в системі Deform-2D, у відповідності до рекомендацій, наведених у розділі 2, використаємо:

- тип моделювання – Lagrangian Incremental (Аналіз Лагранжа) з градієнтною сіткою (коефіцієнт розрідження - 0,1);
- приведена геометрія об'єкта моделювання – Plane Strain;
- тип об'єктів моделювання : заготовка – Elasto-Plastic; інструмент – Rigid;
- метод рішення ітераційних задач – Newton-Raphson (метод Ньютона-Рафсена - розділ 2);
- умова збіжності розрахунку – Conjugate-Gradient Solver (метод об'єднаного градієнта);
- умова текучості матеріалу – Generalized Johnson&Cook Model (узагальнена модель Джонсона-Кука (Рис.6.4));
- критерій руйнування – Normalized C&L Fracture (нормалізований енергетичний критерій Кокрофта-Лейтема - розділ 2)
- модель структурно-фазових перетворень – Avrami model (модель Аврамі - розділ 4);

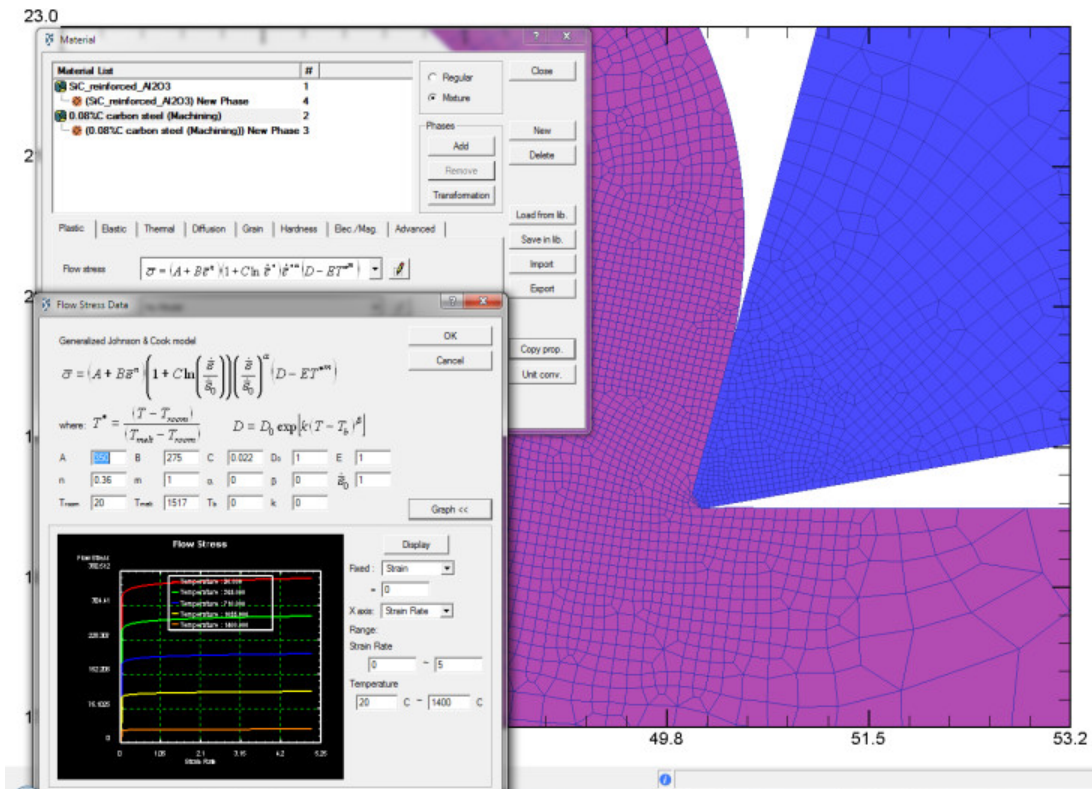
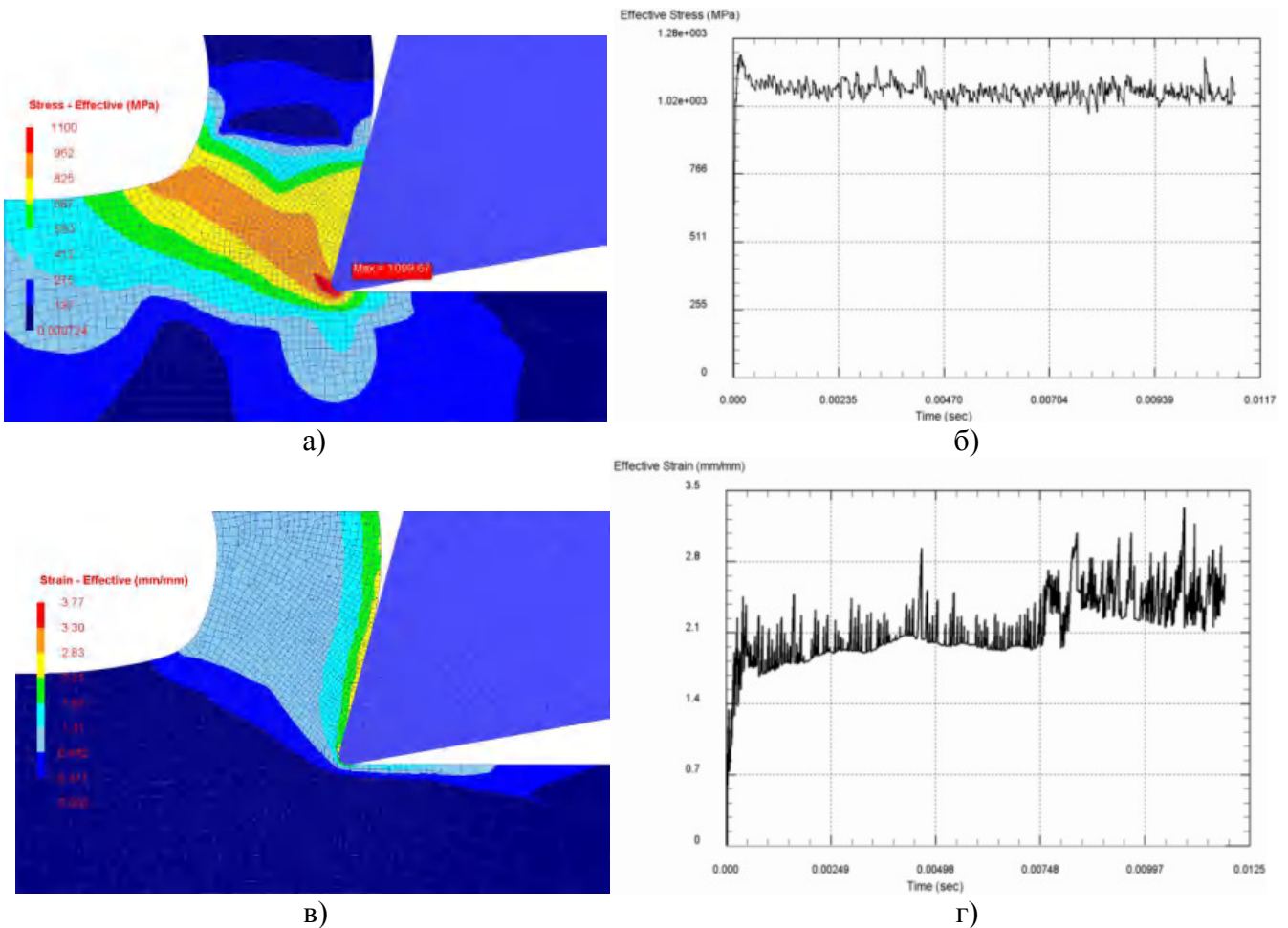


Рис.6.4. Задання параметрів текучості матеріалу заготовки - сталі 3Х2В8Ф (аналог Н21Т20821) для рівняння Джонсона-Кука в системі Deform-2D



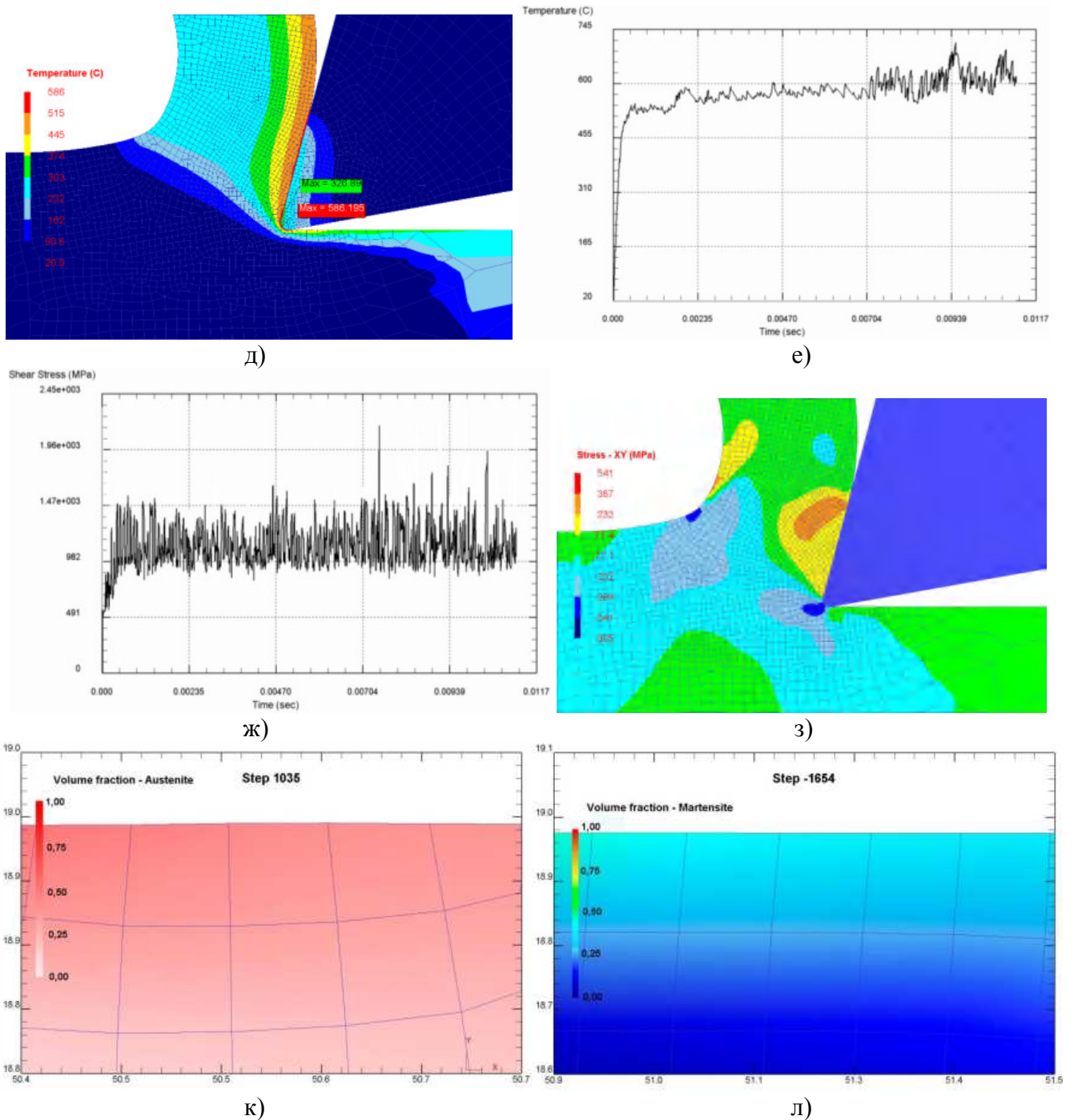


Рис.6.5. Результати реологічного моделювання оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3X2B8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі полікристалічного кубічного нітриду бору марки СВ7025 ($S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв)

а-б – еквівалентне напруження; в-г – приведені деформації; д-е - температура в зоні різання; ж – напруження зсуву; з – картина розподілу напружень стиску-розтягу; к-л – картина структурно-фазового стану поверхні після оброблення.

Результати імітаційного реологічного моделювання наведені на Рис.6.5.

Як було показано в розділі 4, мікропрофіль обробленої поверхні, що визначає значення її шорсткості, утворюється в результаті векторного додавання трьох складових (рис.4.1): висоти мікронерівностей, що одержується як результат копіювання різального клину інструмента з урахуванням кінематичних характеристик його руху (Δ_1), висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки (Δ_3).

Геометрико-кінематична складова мікронерівності Δ_1 при умовах: $\varphi > \arcsin(s/2r)$ і $\varphi_1 \geq \arcsin(s/2r)$ після перетворення у рівняння Чебишева [293, 294] становить:

$$\Delta_1 = \frac{S^2}{8r} = \frac{0,05^2}{8 \cdot 0,5} = 0,000625 \text{ мм} = 0,625 \text{ мкм} \quad (6.3)$$

Методика визначення висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) детально описана в розділі 4. Причому нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому переході ($Ra_{i-1}=5$ мкм). У моделі сили різання залежать від геометричних параметрів інструменту і механічних характеристик ортогонального різання:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + K_x \dot{x} + C_x x = \tau_{xy} \cdot S_i \times \\ \times \left(b_1 + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\sin \beta \cdot \cos(\beta + \eta - \gamma)} \\ M\ddot{y} + K_y \dot{y} + C_y y = \tau_{xy} \cdot S_i \times \\ \times \left(b_1 + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin(\eta - \gamma)}{\sin \beta \cdot \cos(\beta + \eta - \gamma)} \end{cases} \quad (6.4)$$

Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MathLAB, знаходимо амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи (рис.4.11).

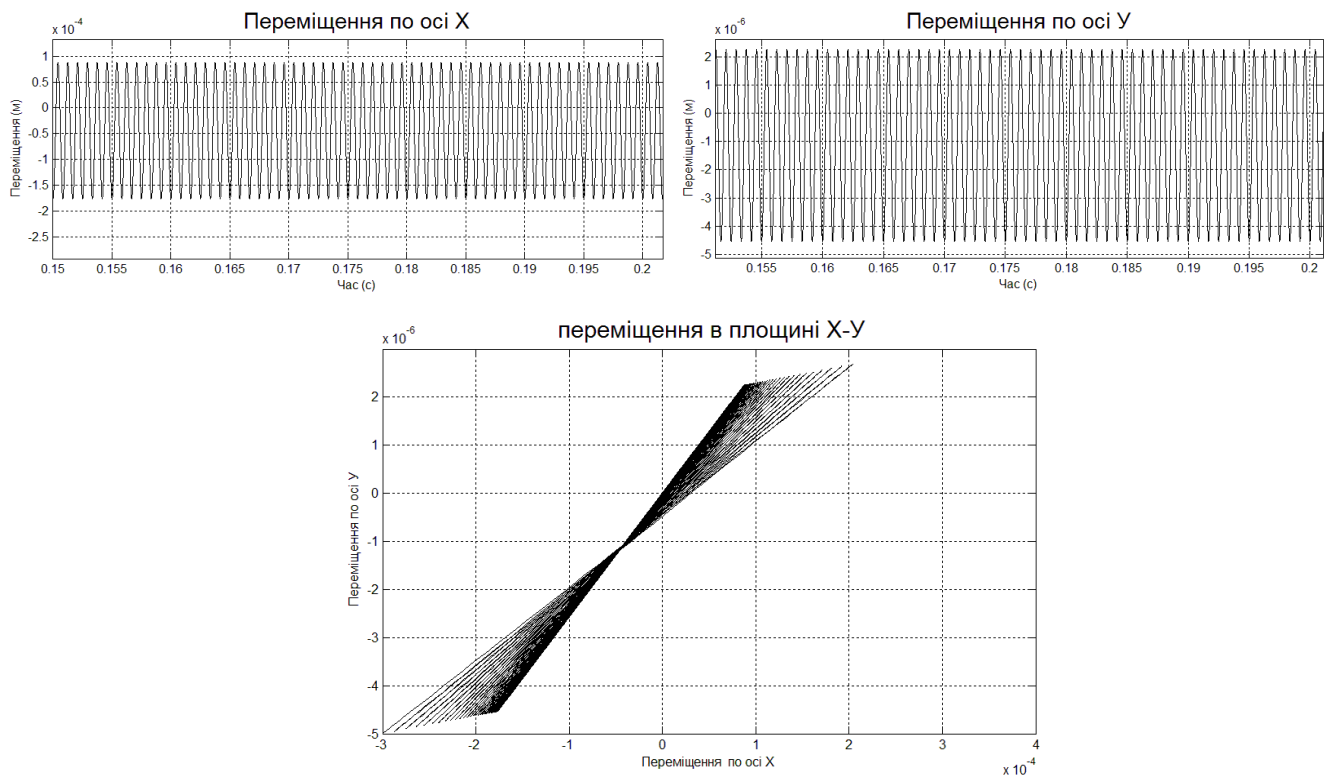


Рис.6.6. Результати моделювання автоколивань різального інструменту при обробленні виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3Х2В8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі полікристалічного кубічного нітриду бору марки СВ7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв)

Лінійні гармонійні коливання інструменту в радіальному напрямі у поєднанні з головним обертовим рухом заготовки і поступальною подачею викликають утворення нерівностей в подовжньому (співпадаючому з напрямом головного руху) і поперечному (перпендикулярному йому) напрямі. Високочастотні коливання інструменту мають істотний вплив на шорсткість поверхні.

Мікрорельєф поверхні в поперечному напрямі моделюється накладенням на масив переміщень інструменту профілю його вершини в плані, який описується дугою радіусу R . В цьому випадку [196]:

$$\Delta_2 = 2A_{\max} - H_B = 2 \cdot 0,00027 - 0,00015 = 0,00039 \text{ мм} = 0,4 \text{ мкм} \quad (6.5)$$

$$\text{де } A_{\max} = \frac{\chi}{\sqrt{(J^{\text{рад}} + \chi - m p^2 \omega^2)^2 + \mu_{mp}^2 p^2 \omega^2}} H_{\text{вих}} - \text{максимальна амплітуда коливань}$$

інструменту, визначувана при рішенні диференціального рівняння руху

інструменту; J^{pad} - радіальна жорсткість технологічної системи, Н/мм; (χ - коефіцієнт, залежний від конкретних умов оброблення; m - приведена маса рухомої системи, кг; $\omega = \frac{\pi n}{30} = 167,5$ рад - циклічна частота головного руху;

$H_{e_{i-1}} = \frac{Ra_{i-1}}{2} = 0,0025$ мм - амплітуда нерівностей поверхні, отриманої в результаті виконання попереднього технологічного переходу.

Слід вершини інструменту на даному технологічному переході:

$$\begin{aligned} H_{e_i} &= R - (R - r) \cos \frac{\Psi}{2} - \sqrt{r^2 - \left((R - r) \sin \frac{\Psi}{2} \right)^2} = \\ &= 0,85 - (0,85 - 0,5) \cos \frac{0,143}{2} - \sqrt{0,5^2 - \left((0,85 - 0,5) \sin \frac{0,143}{2} \right)^2} = 0,00015 \text{ мм} \end{aligned} \quad (6.6)$$

де центральний кут для лезових інструментів з геометрією Wiper (WH) [195]:

$$\Psi = \arccos \left(1 - \frac{S^2}{2(R - r)^2} \right) = \arccos \left(1 - \frac{0,05^2}{2(0,85 - 0,5)^2} \right) = 0,143 \text{ рад} \quad (6.7)$$

Складова профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки Δ_3 визначаємо за формулою (4.22) при умовах: $\varphi > \arcsin(s/2r)$ і $\varphi_1 \geq \arcsin(s/2r)$

$$\begin{aligned} \Delta_3 &= \frac{\left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}} \right) \cdot \left(2S_i + \frac{r}{2} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}} \right) \right)}{64} = \\ &= \frac{\left(1 - \frac{992}{\sqrt{992^2 + 1099^2}} \right) \cdot \left(2 \cdot 0,05 + \frac{0,5}{2} \cdot \left(1 - \frac{992}{\sqrt{992^2 + 1099^2}} \right) \right)}{64} = 0,0001 \text{ мм} \end{aligned} \quad (6.8)$$

де τ_{xy} - динамічне напруження зсуву, МПа;

$\bar{\sigma}$ - ефективне середнє напруження, МПа.

Отже, для даного випадку середні значення висоти мікронерівностей, що одержується як результат копіювання різального клину інструмента з урахуванням

кінематичних характеристик його руху (Δ_1) становлять 55,5%, висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) – 34,7% та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки (Δ_3) – 9,8%, відповідно. Таким чином $Ra = 0,625 + 0,39 + 0,13 = 1,125$ мкм, що відповідає технічним умовам креслення (Рис.6.2) (задане $Ra = 1,25$ мкм).

Виникнення залишкових напружень 1-го роду в поверхневому шарі при механічному обробленні (детально проаналізовано в розділі 4.2.1) викликане наступними головними причинами:

- Зменшенням густини матеріалу деталі, що викликано його пластичною деформацією, внаслідок чого питомий об'єм металу в поверхневому шарі збільшується на 0,3 - 0,8% в порівнянні з серцевиною. Цьому збільшенню об'єму пластично деформованого металу поверхневого шару перешкоджають пов'язані з ним недеформовані шари, що розташовані глибше. В результаті в зовнішньому шарі деталі виникають напруження стиску, а в шарах, що залягають глибше – залишкові напруження розтягу (Рис.6.5(з)).

- Різальний інструмент деформує кристалічні зерна металу поверхневого шару обробленої поверхні у напрямі швидкості різання. Цим деформаціям сприяє також тертя задньої поверхні інструменту об оброблену поверхню заготовки.

- Тепло в зоні різання практично миттєво нагріває тонкі поверхневі шари металу, що призводить до збільшення його питомого об'єму (Рис.6.5(д-е)). Після проходження інструменту ці шари швидко охолоджуються і стискаються, проте цьому стиску перешкоджають «холодний» шар, що залягає глибше.

На Рис.6.7(а) наведена реологічна картина 2D моделювання технологічного переходу оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталі 3Х2В8Ф) інструментом з композитною пластинкою марки СВ7025. Загальний шлях інструменту розділений на 12 діапазонів вимірювань з метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ напружено-деформаційної складової післядії процесу оброблення. Слід зауважити, що поява різкої зміни

напружень з наступним їх збільшенням (Зона 1 - Рис.6.7(б)) обумовлена інтерференційними явищами впливу різними за знаками ($\pm\sigma_z$) силового (менш здатного до релаксації) та температурного чинника (більш локалізованого в зоні стружкоутворення). Це явище ще раз свідчить про якісну адекватність картини розподілу напружень та деформацій в заготовці в результаті лезового оброблення.

В результаті реологічного моделювання в САФ-системі можна встановити величини залишкових напружень ($\pm\sigma_z$), глибину їх залягання і закон розподілу. Очевидно, що в межах вирішення даної задачі будуть моделюватись тільки термодиформційні залишкові напруження I роду. Аналіз структурно-фазових залишкових напружень II роду, що формуються внаслідок фазової деформації окремих кристалітів та зерен, вимагає якісно іншої постановки задачі і буде розглянуто нижче. Як це вже констатувалось в розділі 4, напруження III роду врівноважуються в субмікрооб'ємах, співмірних з міжатомарними віддальми і не є домінуючими при формуванні поверхневого шару, що сформований внаслідок параметричного впливу технологічних чинників, а тому в даній роботі проаналізовані не будуть.

На Рис.6.8 наведена картина реологічного моделювання залишкових напружень I роду в результаті фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3X2B8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025. Ця крива залишкових напружень відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (температурних та фрикційних) та стискаючих (силових) навантажень. Ці напруження експотенційно зменшуються в результаті термодинамічної релаксації із зростанням віддалі від вершини різального клину вздовж обробленої поверхні. Глибина залягання пластичних деформацій визначається на основі вирішення задачі Прандтля [293, 294]. Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно 155 МПа при обробленні заготовки виштовхувача, виготовленого зі сталі 3X2B8Ф інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025.

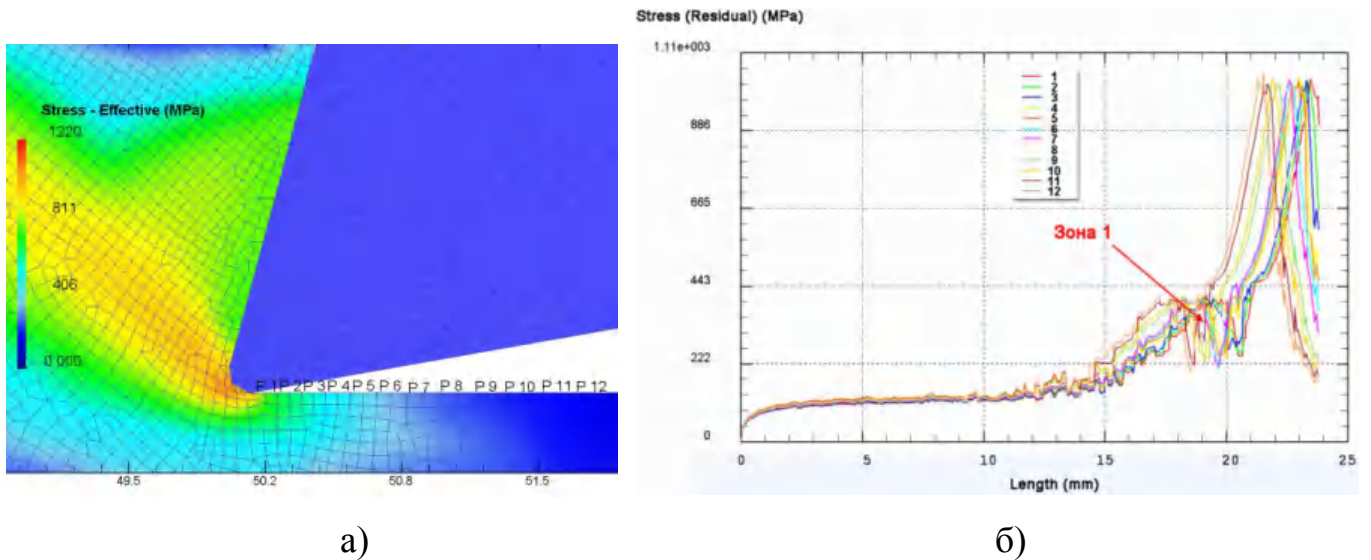


Рис.6.7. Результати реологічного 2D моделювання фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3Х2В8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв) в системі Deform2D

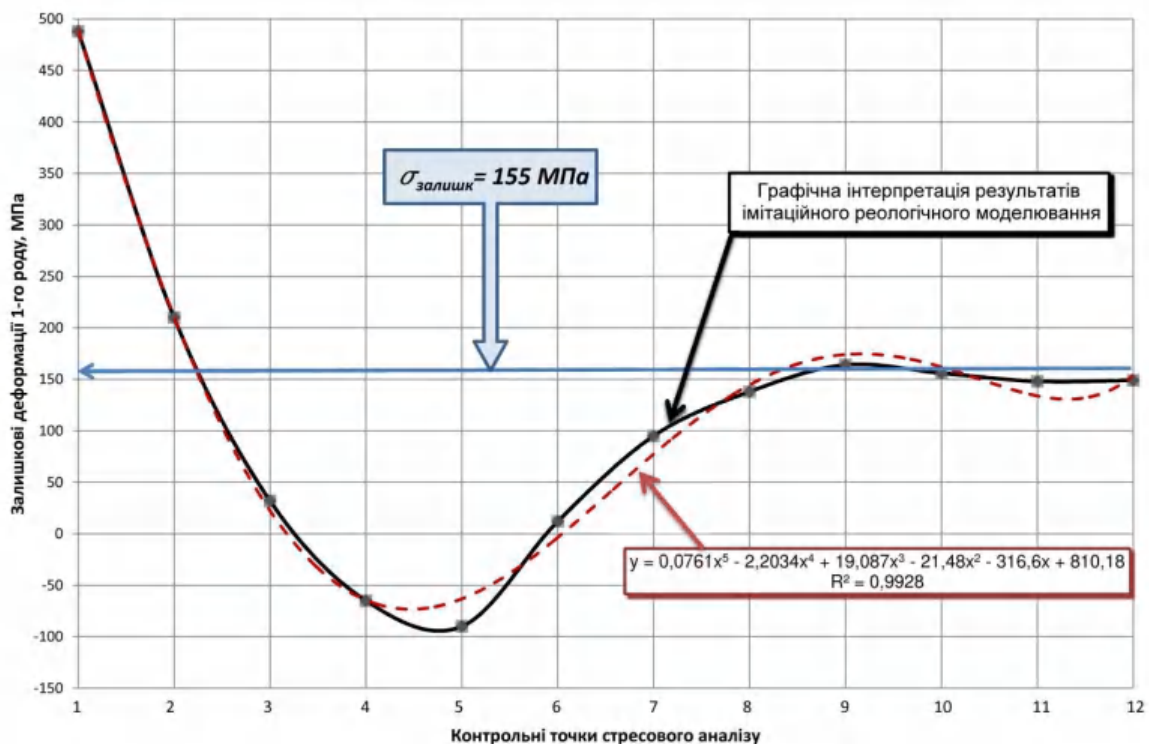


Рис.6.8. Графічні залежності залишкових напружень I роду, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3Х2В8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025

Термодинамічний стан поверхневого шару оброблюваної деталі з низьковуглецевої легованої сталі 3X2B8Ф, схильної до фазових перетворень, викликає структурні зміни, появу іншого фазового складу з іншим питомим об'ємом фазових складових. При шліфуванні загартованої заготовки з цієї сталі з мартенситною структурою в поверхневому шарі під дією високих температур утворюються структури трооститу, які мають менший питомий об'єм, чим структура мартенситу. Таким чином на поверхні заготовки розвиваються залишкові напруження розтягу, а в шарах, що пролягають нижче, - напруження стиску, що урівноважують їх. З іншої сторони, при лезовому обробленні малопластичної сталі 3X2B8Ф утворюється елементарна стружка, при цьому домінують формуються в поверхневому шарі залишкові напруження стиску. При точінні загартованих матеріалів із зростанням швидкості різання і збільшенням тепловиділення в поверхневому шарі відбувається відпуск металу, що зменшує його питомий об'єм і викликає додаткові напруження розтягу, внаслідок чого сумарна величина залишкових напружень стиску зменшиться [299].

Для аналізу впливу структурно-фазового чинника, слід сформулювати початкові умови. Нехай первинна (отримана до оброблення) структура поверхневого шару виштовхувача, виготовленого з низьковуглецевої легованої сталі 3X2B8Ф була об'ємно однаковою і мала густину ρ_1 . Під дією температурного і деформаційного впливу в процесі різання, шар деталі глибиною $\Delta_z = R_1 - R_2$ піддався рівномірним фазовим або мікроструктурним перетворенням, в результаті чого після повного охолодження отримав нову структуру з густиною ρ_2 . Очевидно, що аналогічно до процесу термооброблення, нерівномірний вплив температурного та деформаційно-силового чинника спричинить динамічну залежність фазової структури обробленого матеріалу заготовки по глибині. Тому й густина новоутвореної фази стає функціональною: $\rho_2(l) = f(T(l), \bar{\sigma}(l), \delta(l))$. У відповідності до досліджень, проведених у розділі 4.2.2, констатується факт, що якщо густина ρ_2 перевищує початкове значення ρ_1 , то питомий об'єм матеріалу зменшується, що і викличе залишкові деформації II роду.

Сталь 3X2B8Ф має високу в'язкість завдяки низькому вмісту вуглецю. У відпаленій сталі міститься близько 12 % важкорозчинного карбиду М6С. Гартуючи сталь в маслі при температурі 1050 - 1100°C, розчиняють в аустеніті близько 7% карбідів, збагачуючи його вуглецем, вольфрамом і хромом. Після гартування структура складається з легованого мартенситу, 5% надлишкових карбідів і невеликої кількості залишкового аустеніту, НРС 48-50. Після відпуску при 600 - 620°C структура складається з троостита і 5% надлишкових карбідів, НРС 38-44 [266]. Карбід М6С коагулює лише при температурах вище 600°C, що забезпечує високу червоностійкість і жароміцність. Таким чином, якщо при механічному обробленні деталі з загартованої сталі 3X2B8Ф із мартенситною структурою в поверхневому шарі, виникне структура мартенсито-аустенітна або мартенсито-трооститна, то на обробленій будуть створені умови виникнення залишкового розтягуючого напруження, оскільки $1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} > 0$. Причому об'ємний вміст мартенситної фази ζ_M відповідно до бездифузійної моделі фазових перетворень описується формулою МакДжі [51]:

$$\zeta_M = 1 - \exp \left\{ \psi_1 T + \psi_2 C + \psi_{31} \sigma_m + \frac{\psi_{32}}{\sqrt{\sigma}} + \psi_4 \right\} \quad (6.9)$$

де $\psi_1, \psi_2, \psi_{31}, \psi_{32}, \psi_4$ - константи, що характеризують певний оброблюваний матеріал (склад легуючих елементів, умови рекристалізації тощо);

T – температура в зоні аналізу структурного стану;

C – відсотковий вміст вуглецю;

$\sigma_m, \bar{\sigma}$ - середнє та еквівалентне напруження в зоні різання, МПа.

Структурний об'єм аустенітної фази ζ_A сталі визначався із спільного моделювання теплових полів і структурно-фазових перетворень за допомогою рівняння Аврамі-Джонсона-Мела [21, 51]:

$$\zeta_A = 1 - \exp \{ -k \cdot \tau^n \} \quad (6.10)$$

де ζ_A - об'ємна доля аустенітної фази, що утворюється в результаті механічного оброблення;

k і n - кінетичні параметри, обчислення яких відбувається по кінетичних діаграмах розпаду аустеніту [55];

τ - час різання.

Таким чином, змодельовавши напружено-деформований та термодинамічний стан зони різання та маючи емпіричні коефіцієнти $\psi_1, \psi_2, \psi_{31}, \psi_{32}, \psi_4$ [26], можна здійснити моделювання залишкових напружень II роду в середовищі Deform NT2. В результаті реологічного моделювання фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3X2B8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 отримані хромограми об'ємного фазового стану матеріалу (Рис.6.5(к, л)). Приймаючи до уваги аналог сталі 3X2B8Ф - H21T20821 (США) [51] використовуємо коефіцієнти для формули Аврамі-Джонсона-Мелла:

$$\zeta_M = 1 - \exp\{0,025T - 0,002315\sigma_m - 0,003314\bar{\sigma} - 5,35\} \quad (6.11)$$

В даному випадку приймаємо, що «білий шар» має первинну мартенситну структуру з базовою твердістю 65HRC і становить не менше 68% фазового об'єму матеріалу. Мікротвердість «білого шару» становить 9,0-10 ГПа. Інший об'єм (менше 32%) заповнює трооститна структурна фаза з базовою твердістю близько 40HRC. Ця зона містить переважно феритно-карбідну фазу, але з пониженим вмістом вуглецю, хрому і інших карбідотвірних елементів. Одночасно з утворенням білого шару виникає система внутрішніх напружень, яка призводить до розтріскування поверхневого шару деталі і викришування його окремих часток в період подальшої експлуатації виробу. Оскільки результати реологічного моделювання дозволяють визначити тільки відсотковий вміст мартенситної фази ζ_M , то можна умовно припустити, що інший об'єм займає перлітна (або трооститна) фаза, тобто $\zeta_P = 1 - \zeta_M$. Крім того, середньостатистичне значення густини ρ_Σ утвореної в результаті впливу термодинамічних та силових чинників різання обробленої поверхні з поліфазною структурою є еквівалентним густинам різних фаз ρ_i у відповідності до їх відсоткового вмісту ζ_i . Тобто:

$$\sigma_{\phi}(l) = E_M \left(1 - \frac{\rho_M \cdot \zeta_M(l) + \rho_{II} \cdot [1 - \zeta_M(l)]}{\rho_{II}} \right) \quad (6.12)$$

де $\sigma_{\phi}(l)$ – значення залишкового напруження II роду на глибині l [мкм] їх залягання на обробленій поверхні;

$E_M=224$ — модуль Юнга сталі 3Х2В8Ф, ГПа

За результатами реологічного аналізу (рис.6.5 (к)), на поверхні заготовки об'ємна фаза становить лише $\zeta_M=0,45\dots0,47$ (45-47%), що заперечує утворення «білого шару». За формулою (6.11) $\zeta_M = 0,395$ (39,5%):

$$\zeta_M = 1 - \exp\{0,025 \cdot 330 - 0,002315 \cdot 620 - 0,003314 \cdot 594 - 5,35\} = 0,395$$

Похибка імітаційного і розрахункового значення не перевищує в даному випадку 12,5%, що є цілком сприйнятливим для підтвердження адекватності моделювання.

Отже, значення залишкового напруження II роду на поверхні деталі становить лише $\sigma_{\phi} \approx 5,5$ МПа. Це, в першу чергу, обумовлено низькою температурою в зоні різання, що не сприяє фазовим перетворенням, а, отже, і не створює суттєвих залишкових напружень II роду. Ці дослідження ще раз підтверджують відомі експериментально доведені твердження [299], що оброблення низько- та середньовуглецевих сталей при дуотермічному механізмі формування стружки при лезовому обробленні, повністю анігілює механізм утворення «білого шару» і не має суттєвого впливу на формування залишкових деформацій II роду. Значущі результати цих напружень можуть бути отримані тільки в результаті інтенсивного лезового оброблення на швидкостях більше 100 м/хв лише для матеріалів з метастабільною структурою і, як правило, в умовах адіабатичного механізму стружкоутворення.

Розрахунок залишкових деформацій виконується за теоремою про розвантаження, згідно якої залишкові напруження після пластичної деформації дорівнюють різниці напружень при пластичній деформації і так званих розвантажувальних напружень, від яких матеріал позбавляється при розвантаженні [125, 263]. Процес утворення залишкових деформацій стиску поверхневого шару

металу розвивається під дією сил в зоні різання. При механічному обробленні в зоні різання одночасно діють значні зусилля різання, що створює наклеп, і діє висока температура, що спричинює розм'якшення металу. В процесі оброблення точінням наклеп поверхневого шару підвищується при збільшенні подачі і глибини різання у зв'язку із зростанням радіусу скруглення різального леза і при переході від позитивних передніх кутів різця до негативних [259]. Збільшення деформаційного зміцнення при зменшенні подачі за межами оптимальних значень подач пояснюється впливом процесу ковзання різального леза, що створює додаткову деформацію поверхневого шару. Характер цих залежностей визначається силовим навантаженням і температурою нагріву металу в зоні різання.

На Рис.6.9 наведена розрахункова схема для визначення залишкових деформацій на 2D моделі технологічного переходу фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025. З метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ напружено-деформаційної складової післядії процесу оброблення загальний шлях інструменту по довжині обробленої частини деталі розділений на 24 діапазони, а по глибині – на 16 діапазонів вимірювань. Формування залишкових деформацій по тестових точках зображено на Рис.6.10. Крива залишкових деформацій (Рис.6.10) відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних температурних, силових та фрикційних процесів, що виникають в процесі формоутворення деталі. Середньостатистичне значення залишкових деформацій в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно $\varepsilon \approx 2,28$ (мм/мм) при фінішному токарному обробленні виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3X2B8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв).

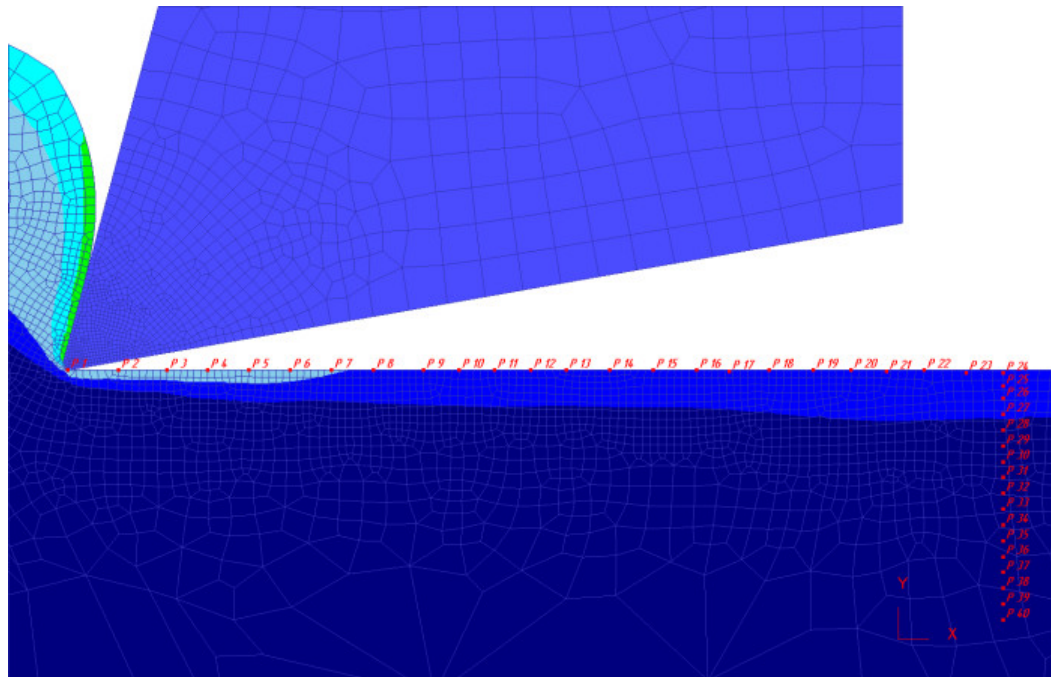


Рис.6.9. Розрахункова схема для визначення залишкових деформацій на 2D моделі технологічного переходу фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми в системі Deform2D

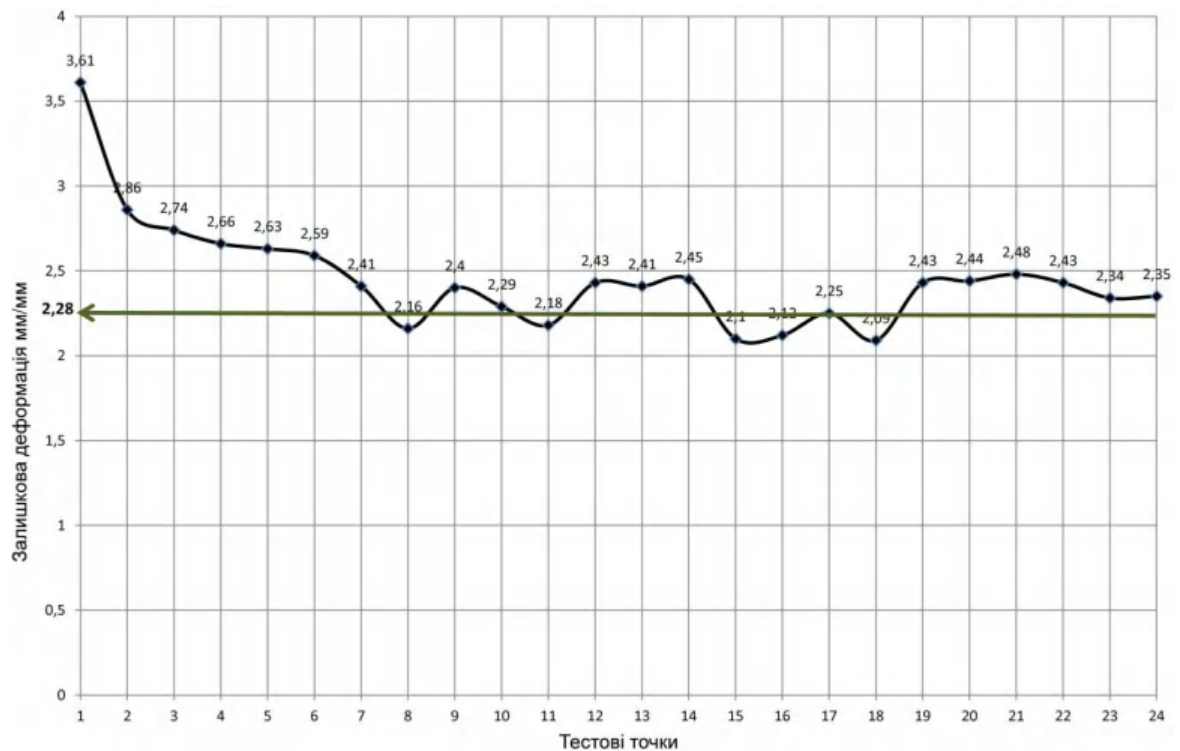


Рис.6.10. Графічні залежності поверхневих залишкових деформацій, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми в системі Deform2D ($S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв)

Методика визначення глибини залягання залишкових напружень є подібною - але тестові точки вимірювання деформацій розташовані не по довжині обробленої поверхні, а вглиб (Рис.6.9). Очевидно, що моделювання картини глибини залягання також слід робити в зоні термічної стабілізації обробленої поверхні. Результати моделювання наведені на Рис.6.11.

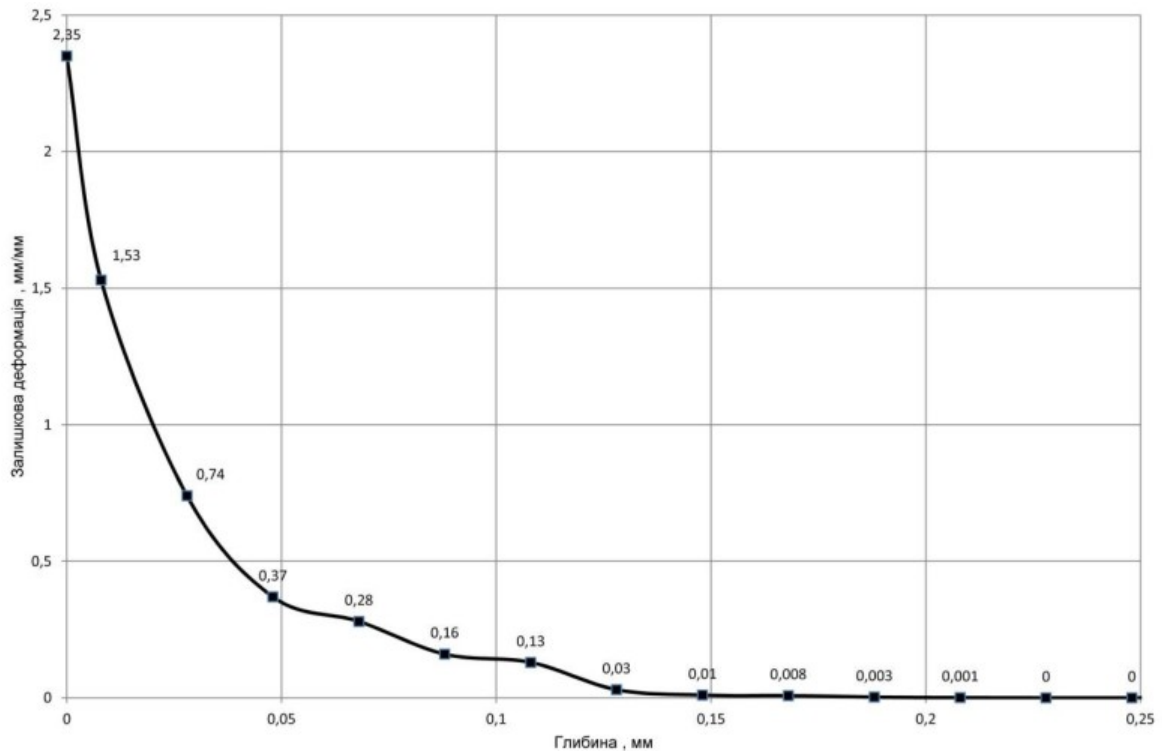


Рис.6.11. Графічні залежності глибини залягання залишкових деформацій, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми в системі Deform2D ($S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв)

Аналіз графічних залежностей (Рис.6.11) доводить експоненційний характер зменшення залишкових деформацій: якщо на поверхні деталі ця величина становила $\varepsilon \approx 2,35$ (мм/мм), то на глибині 0,05 мм – вже $\varepsilon \approx 0,37$, а на глибині 0,12 мм деформація практично анігілюється і становить лише $\varepsilon \approx 0,03$ (мм/мм). Якісний та кількісний характер розподілу деформацій доводить адекватність та ефективність запропонованих методик для формування аналітичної бази при побудові функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

При лезовому обробленні матеріалів ступінь наклепу може бути розрахований за емпіричним рівнянням Сіліна С.С. [259]:

$$N = 40h_3T^{-0,72} = 40 \cdot 0,12 \cdot 580^{-0,72} = 0,049 \quad (6.13)$$

де $h_3=0,12$ мм — глибина наклепу, що визначається за результатами реологічного моделювання технологічних переходів механічного оброблення, мм (Рис.6.11);

$T=580^\circ\text{C}$ — температура в зоні різання при роботі інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 ($S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв), що також визначається за результатами реологічного моделювання (Рис.6.5).

Мікротвердість поверхневого шару має суттєве значення на забезпечення функціональних властивостей виштовхувача прес-форми після його тривалої експлуатації при високій робочій температурі [222]. Зростання ступня наклепу полегшує процес вигоряння легуючих елементів жароміцних сплавів, яке призводить до зниження їх міцності [263]. Крім того, із збільшенням ступня і глибини наклепу високолегованих сталей їх втомна міцність при роботі в середовищі з високою температурою значно знижується.

Значення ступня наклепу у випадку фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3X2B8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 не є порівняно великим, оскільки незначною є глибина різання ($t=0,12$ мм) та відносно невисока температура в зоні різання ($T \approx 580^\circ\text{C}$). За результатами експериментальних досліджень [237] при круглому шліфуванні легованої сталі 3X2B8Ф значення ступня наклепу становить $N=0,5\dots0,6$, що має суттєві негативні наслідки на умови експлуатації деталей прес-форм, зокрема.

В табл.6.1. наведені порівняльні характеристики альтернативних варіантів фінішного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3X2B8Ф): токарного оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 та викінчувального шліфування алмазним кругом на металічній зв'язці АСВ 125/100 М5-2 (режими різання $V_k=31$ м/с, $t=0,01$ мм, $S_n=$

6 м/хв, ширина круга $B=10$ мм) [252]. Продуктивність такого шліфування складає приблизно $Q=40$ мм³/хв; питома продуктивність 30-35; питомі витрати алмазів – 3,6 мг/г [292]. При цьому порівнюються вищенаведені результати імітаційного моделювання з середньостатистичними результатами експериментальних досліджень, отриманих при виготовленні виштовхувача прес-форми на базовому підприємстві (ТЗОВ «ІнтерПЕТ»).

Всі експериментальні взірці пройшли нітроцементацию в термічному цеху ТЗОВ «ІнтерПЕТ» на безмуфельному агрегаті БА-2 (гартування $1020\pm 10^\circ\text{C}$, олива, низький відпуск $230\pm 10^\circ\text{C}$, повітря). Глибина нітроцементации – 0,85-0,92 мм. Умовні позначення нітроцементованих взірців під точіння інструментом з CNB на керамічній зв'язці: №1НЦТ-6НЦТ; під викінчувальне шліфування алмазним кругом на металічній зв'язці: №7НЦШ-12НЦШ. Фотографії зрізу нітроцементованих взірців (в даному випадку №3НЦТ) наведені на Рис.6.12. В поверхневому шарі взірців спостерігаються білі нетравимі карбонітриди, азотистий залишковий аустеніт, азотистий мартенсит, а в серцевині – маловуглецевий мартенсит. Слід зауважити, що наявність залишкового аустеніту на поверхні деталі суттєво впливає на утворення мікротріщин в результаті шліфування дослідного взірця, що, в свою чергу не характерно для точіння інструментом з CNB на керамічній зв'язці.

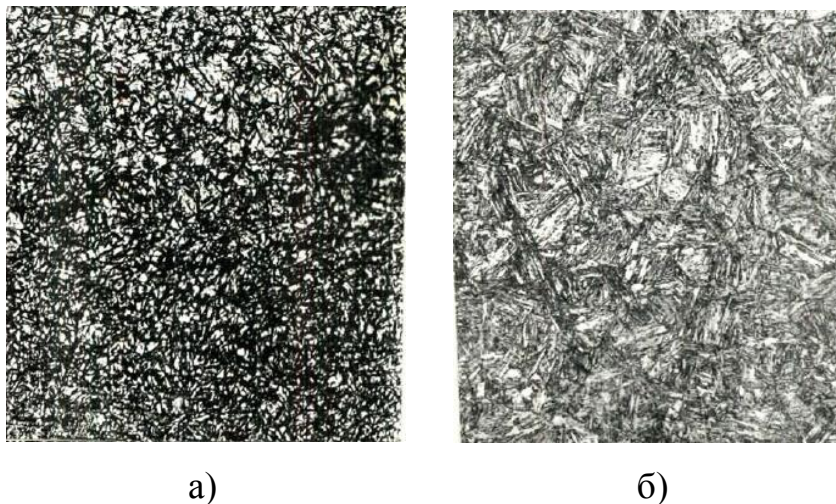


Рис.6.12. Мікроструктура гартованих взірців зі сталі 3X2B8Ф (фото з скануючого мікроскопу NanoScope IIIa Dimension 3000 – збільшення $\times 320$) - а) поверхневого шару; б) серцевини

Табл. 6.1 Порівняльна таблиця результатів аналітичних та експериментальних досліджень фінішного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3Х2В8Ф)

		Результати аналітичних досліджень в системі Deform2D	Середньостатистичні результати експериментальних та виробничих досліджень (ТЗОВ «ІнтерПЕТ»)	
Параметри		Фінішне токарне оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: S=0,05 мм; t=0,12 мм; V=50,2 м/хв)	Шліфування алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 (режими різання V _к = 31 м/с, t = 0,01 мм, S _н = 6 м/хв)	
Параметри мікротопології поверхні	Ra, мкм	1,125	1,29	1,22
	Δ ₁ , мкм	0,625	-	
	Δ ₂ , мкм	0,39		
	Δ ₃ , мкм	0,13		
	Rpk, мкм	0,30	0,28	0,43
	Rk, мкм	0,75	0,84	0,61
	Rvk, мкм	0,12	0,17	0,18
	Rmax	-	2,0	2,2
	r	-	35	20
	b	-	2,0	1,29
	v	-	1,7	1,9
	$\Delta = \frac{R \max}{rb^{\frac{1}{v}}}$	-	0,024	0,096
Залишкові напруження	$\pm\sigma_{зал_1}$, МПа ³	+155	-	
	$\pm\sigma_{зал_2}$, МПа	-5		

³ Знак «+» передбачає наявність на обробленій поверхні заготовки залишкових напружень стиску, а знак «-» - залишкових напружень розтягу

	$\pm\sigma_{\text{зал}_\Sigma}$, МПа	+150	+143	-130
Залишкові деформації	Глибина наклепу h_3 , мм	0,12	-	-
	Ступінь наклепу, N	0,049	0,06	0,5

6.3. Структурно-параметрична оптимізація функціонально-орієнтованого технологічного процесу оброблення виштовхувача прес-форми

Згідно наведеному в розд.5.3 алгоритму структурно-параметричної оптимізації, перш за все слід реалізувати етап розрахунку локальних критеріїв оптимізації. Одним з найбільш важливих критеріїв є показник інтенсивності зношування функціональних поверхонь в потенційних або критичних умовах експлуатації виробу в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення найбільш навантажених поверхонь виробу. Причому такий розрахунок проводиться на основі концепції зношування згідно нормативних рекомендацій Р.50-95-88 «Забезпечення зносостійкості виробів» та ДСТУ 2823-94 [139]. Важливо сформулювати початкові умови для подальшого розрахунку: розглядається зношування двох повністю спряжених тіл у стаціонарному (сталому) режимі сухого або граничного тертя; зношуванню підлягає виштовхувач прес-форми: тіло - жорстке і шорстке; спряжена напрямна втулка приймається як гладке і деформоване контртіло; номінальний тиск, швидкість ковзання і температура тертя постійні в часі і рівномірно розподілені по поверхні контакту.

Для визначення умов пружності або пластичності трибоконтакту, необхідно розрахувати індекс пластичності за формулами (5.6) (модель Дьомкіна) [171, 172, 304] або (5.8) (Вільямсона-Грінвуда) [209]. Вважається, що мікрОВиступ деформується абсолютно пружно за умови:

$$\frac{R_{\max}}{r^2} < K_m \frac{\sigma_T (1 - \mu^2)}{E} \quad (6.14)$$

де r - приведений радіус плями контакту;

σ_T - межа текучості матеріалу (для сталі 3Х2В8Ф $\sigma_T = 1390$ МПа).

K_m - коефіцієнт, що залежить від умов деформування (приймаємо $K_m = 7$ [126]);

μ - коефіцієнт Пуассона ($\mu = 0,28$);

E - модуль Юнга (для сталі 3Х2В8Ф при 700°C $E = 1,77 \cdot 10^5$ МПа).

Для випадку фінішного токарного оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки СВ7025 виконується умова, що є ознакою пружності контакту:

$$\frac{2,0}{35^2} = 0,0016 < 7 \frac{1390(1 - 0,28^2)}{1,77 \cdot 10^5} = 0,05$$

Аналогічно для випадку шліфування алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 контакт вважається пружним, оскільки виконується умова:

$$\frac{2,2}{20^2} = 0,0055 < 7 \frac{1390(1 - 0,28^2)}{1,77 \cdot 10^5} = 0,05$$

Таким чином, в умовах пружного контакту інтенсивність зношування залежить від топології мікрогеометричних характеристик спряжених поверхонь (b , v , Rvk , Rpk , Rk , R_{\max} , t_m), механічних властивостей матеріалів (σ_T , σ_B , $\sigma_{0,2}$, E , μ), коефіцієнта тертя f , втомної характеристики t і тисків - номінального P_a і контурного P_c .

λ - коефіцієнт, що враховує вплив поверхневих залишкових напружень на інтенсивність зношування (при умові, що границя втомної міцності для сталі 3Х2В8Ф - $\sigma_B = 1530$ МПа; - коефіцієнт фрикційної втоми при пружному контакті спряжених поверхонь $t_y = 3$), визначається за формулою:

- для точіння

$$\lambda_1 = \left(\frac{1530 - 143}{1530} \right)^3 = 0,75$$

- для шліфування

$$\lambda_2 = \left(\frac{1530 - (-130)}{1530} \right)^3 = 1,27$$

За формулою (5.36) інтенсивність зношування виробу при заданих умовах його експлуатації у випадку i -го варіанту технологічного процесу виготовлення цього виробу, можна записати:

$$I_{hi} = \frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_i}{\sqrt{v_i} (v_i^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \quad (6.15)$$

Тоді відносний показник зносостійкості $K(I_h)$, що характеризує зміну інтенсивності зношування в залежності від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою:

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\left[\frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_1}{\sqrt{v_1} (v_1^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]}{\left[\frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_2}{\sqrt{v_2} (v_2^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]} = \frac{\sqrt{v_2} (v_2^2 - 1) \cdot \lambda_1}{\sqrt{v_1} (v_1^2 - 1) \cdot \lambda_2} \quad (6.16)$$

де v_i - параметр ступеневої апроксимації кривої Аббота.

Порівнюючи фінішне токарне оброблення виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв) та його шліфування алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 (режими різання $V_k=31$ м/с, $t=0,01$ мм, $S_n=6$ м/хв), отримаємо відносний показник зносостійкості $K(I_h)$:

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\sqrt{1,9} (1,9^2 - 1) \cdot 0,75}{\sqrt{1,7} (1,7^2 - 1) \cdot 1,27} = 0,86$$

Тобто, в результаті зміни структури технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми зносостійкість функціональної поверхні зростає приблизно на 14% внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні та зміни характеру та номінальних значень залишкових напружень.

Серед важливих експлуатаційних чинників роботи виштовхувача прес-форми

слід відзначити відносний показник втомної міцності. Як зазначено в розд.5.1.2, у відповідності до [239], загальний вплив на коефіцієнт запасу втомної міцності n_{-1} мають ряд конструкторсько-технологічних чинників: ефективний коефіцієнт концентрації напружень (n_{eK}); коефіцієнт впливу геометричних розмірів деталі (n_{eD}); коефіцієнт впливу поверхневого зміцнення; (n_{eV}) коефіцієнт впливу шорсткості поверхні (n_{eR}) та коефіцієнт впливу залишкових деформацій, що виникли в результаті механічного оброблення деталі (n_{eZ}). Причому тільки 2 останні показники залежать від якості поверхневого шару виробу, на формування якого впливає структура та параметри технологічного процесу його виготовлення.

Коефіцієнт впливу шорсткості функціональної поверхні виштовхувача прес-форми n_{eR1} у випадку його фінішного токарного оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 можна визначити за формулою Степнова [264]:

$$n_{eR1} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{\sigma_e}{20} \right) - 1 \right) = 1 - 0,22 \cdot \lg 2,0 \cdot \left(\lg \left(\frac{1530}{20} \right) - 1 \right) = 0,94$$

Аналогічно, цей коефіцієнт для випадку шліфування виштовхувача прес-форми алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 становитиме:

$$n_{eR2} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left(\lg \left(\frac{\sigma_e}{20} \right) - 1 \right) = 1 - 0,22 \cdot \lg 2,2 \cdot \left(\lg \left(\frac{1530}{20} \right) - 1 \right) = 0,93$$

В свою чергу, коефіцієнт впливу залишкових деформацій n_{eZ} функціональної поверхні виштовхувача прес-форми n_{eR1} у випадку його фінішного токарного оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 визначається в залежності від інтерференційного домінування залишкових напружень першого і другого роду стиску $\sigma_{eI}^+, \sigma_{eII}^+$ (5.58) і розтягу $\sigma_{eI}^-, \sigma_{eII}^-$ (5.59) (див розд.4):

$$n_{eZ1} = \frac{\sigma_{-1} + (\sigma_{eI}^+ + \sigma_{eII}^+)}{\sigma_{-1}} = \frac{780 + 155}{780} = 1,18$$

де $\sigma_{-1} = 780$ МПа – межа міцності матеріалу при випробуванні на розтяг-стиск

при віднульовому циклі навантаження, характерному при роботі виштовхувача прес-форми [230].

При шліфуванні виштовхувача прес-форми алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2:

$$n_{eZ_2} = \frac{\sigma_{-1} - (\sigma_{eI}^- + \sigma_{eII}^-)}{\sigma_{-1}} = \frac{780 - 130}{780} = 0,83$$

Інші коефіцієнти не залежать від якості поверхневого шару деталі, а тому не будуть мати значення для структурно-параметричної оптимізації технологічного процесу оброблення виштовхувача прес-форми за функціонально-орієнтованими критеріями.

Тоді відносний показник втомної міцності $K(n_{-1})$, що характеризує зміну коефіцієнта запасу втомної міцності n_{-1} в залежності від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою:

$$K(n_{-1}) = \frac{n_{-1_1}}{n_{-1_2}} = \frac{n_{BR_1} \cdot n_{eZ_1}}{n_{BR_2} \cdot n_{eZ_2}} = \frac{0,94 \cdot 1,18}{0,93 \cdot 0,83} = 1,43$$

Тобто, в результаті зміни структури технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми втомна міцність функціональної поверхні зростає приблизно на 43% внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні та зміни характеру та номінальних значень залишкових напружень.

У наукових роботах [230, 293, 294, 307, 327] доведено, що усі процеси руйнування, особливо при циклічному навантаженні залежать від її будови і фізико-хімічного стану. Роль характеру недосконалості поверхні металу істотно зростає при корозійній втомі, що викликається пошкодженням в результаті виникнення на функціональних поверхнях корозійних каверн. На деталях прес-форм внаслідок дії явища фретинг-корозії утворюються мікротріщини та місцеві концентрації напружень, що є причиною подальшої ерозії найбільш навантажених поверхонь деталей, особливо під впливом високошвидкісних температурних деформацій та наявного хімічно-агресивного середовища. Механізм формування хімічної

складової руйнування при фретинг-корозії [307] полягає в наступному: нерівності однієї поверхні стирають нерівності протилежної, проробляючи при цьому борозну з усередненою глибиною ($Rpk+Rk$); у міжповерхневому проміжку адсорбується газ або відбувається окислення спряжених поверхонь; подальші переміщення мікроступів руйнують оксидну плівку. Вони можуть також механічно активувати реакцію адсорбції кисню на метали і сприяти утворення оксиду, який, у свою чергу, також стирається. Причому саме величина виступаючих ділянок мікронерівностей профілю - Rpk_{ekv} та Rk_{ekv} внаслідок корозійного зношування формує механічну складову такого руйнування.

При протіканні фретинг-корозії показники корозійної стійкості в об'ємному еквіваленті τ_m визначають по формулі (5.66) з врахуванням того, що зменшення маси на одиницю площі на допустиму величину становитиме:

$\Delta m = (Rpk_{ekv} + Rk_{ekv}) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)$. В даному випадку апроксимуємо взаємодію

шорстких поверхонь у вигляді контакту сферичної поверхні і пластичного площинного півпростору за методикою А.Ю. Ішлінського [126]. Тоді відносний показник швидкості фретинг-корозійного руйнування $K(\tau)$ визначається за формулою:

$$K(\tau) = \frac{\tau_{m_1}}{\tau_{m_2}} = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \frac{(Rpk_1 + Rk_1) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)}{(Rpk_2 + Rk_2) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)} =$$

$$= \frac{(Rpk_1 + Rk_1)}{(Rpk_2 + Rk_2)} = \frac{0,28 + 0,84}{0,43 + 0,61} = 1,07$$

Тобто, в результаті зміни структури технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми інтенсивність фретинг-корозії функціональної поверхні зростає приблизно на 7% внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні.

Оскільки одним з найважливіших критеріїв працездатності рухомих з'єднань є дотримання режиму рідинного тертя між спряженими поверхнями деталей шляхом

забезпечення мінімальної товщини мастильної плівки в зоні їх трибоконтакту, слід розглянути в якості критерію ефективності функціонально-орієнтованого технологічного процесу, забезпечення несучої здатності плівки, що може бути втрачена внаслідок надмірного навантаження опори при недостатній швидкості ковзання або внаслідок теплового руйнування. Зростання коефіцієнта тертя призводить до прогресуючого збільшення тепловиділення до тих пір, поки температура мастильної плівки досягне критичного значення, при якому втрачаються її змащувальні властивості і виникає безпосередній контакт мікровиступів трибоспряжень. Відносний показник коефіцієнту надійності роботи механічної системи в режимі рідинного трибоконтакту $K(S)$ визначається за формулою:

$$K(S) = \frac{h_{\min_1}}{h_{\min_2}} = \frac{k_s \cdot Rvk_1}{k_s \cdot Rvk_2} = \frac{Rvk_1}{Rvk_2} = \frac{0,17}{0,18} = 0,94$$

Триботехнічна якість спряжень визначається енергетичними втратами на тертя в спряжених поверхнях деталей машин. Відносний показник $K(f)$, що характеризує зміну коефіцієнта тертя у спряженій трибопарі в залежності від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою:

$$K(f) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/\nu_1}}}}{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/\nu_1}}}} = \sqrt{\frac{\Delta_1}{\Delta_2}} = \sqrt{\frac{0,024}{0,096}} = 0,5$$

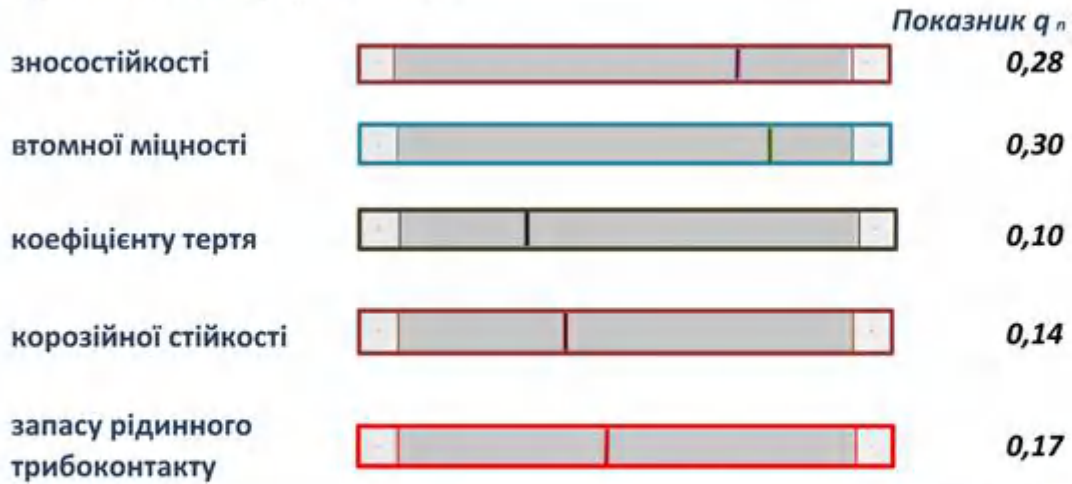
Фрагмент програми розрахунку узагальненого нормативного критерію оптимізації структурно-параметричного варіанту технологічного рішення реалізовано за допомогою розробленої автором [71] програми з використанням програмних продуктів EXCEL та Visual Basic показано на Рис.6.13

**Підпрограма лінійного нормування
кваліметричних критеріїв оптимізації
функціонально-орієнтованого технологічного процесу**

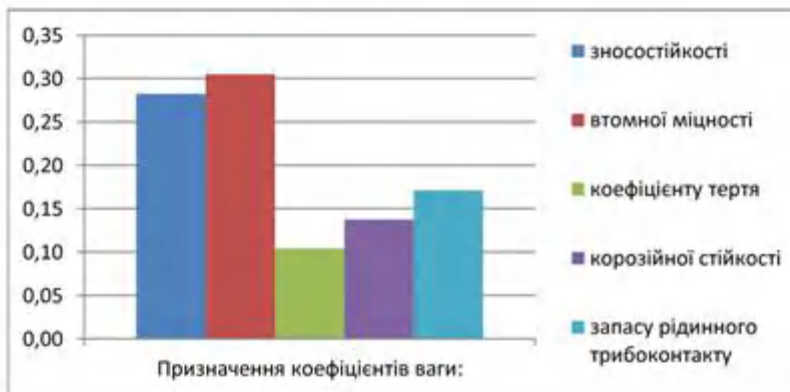
Розрахункове значення відносного параметру зносостійкості (питоме зношування)	$K(l_h) =$	0,86
$\sup(K(l_h)) =$	0,86	$\inf(K(l_h)) =$
		1,16
<hr/>		
Розрахункове значення відносного параметру втомної міцності	$K(n_{-1}) =$	1,43
$\sup(K(n_{-1})) =$	1,43	$\inf(K(n_{-1})) =$
		0,70
<hr/>		
Розрахункове значення відносного параметру коефіцієнту тертя	$K(f) =$	0,50
$\sup(K(f)) =$	0,50	$\inf(K(f)) =$
		2,00
<hr/>		
Розрахункове значення відносного параметру корозійної стійкості	$K(\tau_m) =$	0,93
$\sup(K(\tau_m)) =$	1,07	$\inf(K(\tau_m)) =$
		0,93
<hr/>		
Розрахункове значення відносного параметру запасу рідинного трибоконтакту	$K(S) =$	0,94
$\sup(K(S)) =$	1,06	$\inf(K(S)) =$
		0,94

Рис.6.13. Фрагмент підпрограми лінійного нормування кваліметричних критеріїв та розрахунку функції мети структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3Х2В8Ф)

Призначення коефіцієнтів ваги:



$$\Sigma = 1,00$$



$$Q_1 = \left(\frac{I_h - \inf(I_h)}{\sup(I_h) - \inf(I_h)} \right) \times q_1 = 0,28$$

$$Q_2 = \left(\frac{n_{-1} - \inf(n_{-1})}{\sup(n_{-1}) - \inf(n_{-1})} \right) \times q_2 = 0,30$$

$$Q_3 = \left(\frac{f - \inf(f)}{\sup(f) - \inf(f)} \right) \times q_3 = 0,10$$

$$Q_4 = \left(\frac{\tau_m - \inf(\tau_m)}{\sup(\tau_m) - \inf(\tau_m)} \right) \times q_4 = -0,14$$

$$Q_5 = \left(\frac{S_\tau - \inf(S_\tau)}{\sup(S_\tau) - \inf(S_\tau)} \right) \times q_5 = -0,17$$



Критерій оптимальності $F =$ **0,383**

Рис. 6.13. Продовження

Розрахунок ненормалізованих локальних критеріїв оптимізації за кваліметричними показниками для фінішного токарного оброблення функціональної поверхні виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв) виконується за наведеним в розділі 5.3 алгоритмом і становить для даного прикладу за відносними показниками зносостійкості $Q_1 = 0,28$; за коефіцієнтом запасу втомної міцності $Q_2 = 0,30$; за параметром триботехнічної якості спряжень $Q_3 = 0,10$; за параметром корозійної стійкості $Q_4 = -0,14$; за коефіцієнтом запасу рідинного трибоконтакту $Q_5 = -0,17$. Остаточню узагальнену критерій оптимізації, що визначається за формулою (6.81) дорівнює $F_1 = 0,383$. Оскільки в даному прикладі порівнювались лише 2 варіанти технологічного процесу, узагальнений критерій оптимізації для випадку шліфування функціональної поверхні виштовхувача прес-форми алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 (режими різання $V_k = 31$ м/с, $t = 0,01$ мм, $S_n = 6$ м/хв), становитиме відповідно $F_2 = -0,383$.

Причинами, якими можна аналітично пояснити таке технологічне вирішення є наступні:

- локалізація контакту інструменту з деталлю при лезовому обробленні а, отже, і локальність високої температури в зоні різання є відмінною особливістю точіння у порівнянні з шліфуванням, що є наслідком короткочасності впливу високої температури на оброблену поверхню. При лезовому обробленні висока температура не проникає на велику глибину і не встигає призвести до суттєвих фазово-структурні змін в поверхневому шарі деталі, чим і пояснюються незначні залишкові деформації II-го роду. При шліфуванні частка роботи, що переходить в теплоту, складає 88...97% загальної роботи різання [102]. В зоні контакту шліфувального круга з деталлю, що значно перевищує площу контакту різця з деталлю, біля кожного зерна з металом виникає локальне теплове джерело, залишаючи на поверхні контакту невелику ділянку високої температури, яка зміщується по поверхні із швидкістю обертання круга.

- При шліфуванні загартованої заготовки з цієї сталі з мартенситною структурою в поверхневому шарі під дією високих температур утворюються структури трооститу, які мають менший питомий об'єм, ніж структура мартенситу. Таким чином на поверхні заготовки розвиваються залишкові напруження розтягу, а в шарах, що пролягають нижче, - напруження стиску, що урівноважують їх. З іншої сторони, при лезовому обробленні малопластичної сталі 3X2B8Ф утворюється елементна стружка, при цьому формуються в поверхневому шарі залишкові напруження стиску. При точінні загартованих матеріалів із зростанням швидкості різання і збільшенням тепловиділення в поверхневому шарі відбувається відпуск металу, що зменшує його питомий об'єм і викликає додаткові напруження розтягу, внаслідок чого сумарна величина залишкових напружень стиску зменшиться [299].
- Враховуючи те, що для пари композит CNB – гартована сталь коефіцієнт тертя набуває значення 0,18-0,2 [215], то умовний кут тертя ψ становитиме приблизно 10° . Тобто, при різанні лезовим інструментом може бути реалізована умова $\bar{\sigma} \rightarrow \sigma_{стиск}$, при якій умовний кут зсуву матеріалу $\beta \approx 40-45^\circ$, тобто товщина зрізу фактично дорівнює товщині стружки. Таким чином застосування інструменту з CNB потенційно дозволяє реалізувати мінімальну енергоємність оброблення при нульовому і навіть негативному передньому куті інструмента. В результаті досягається подвійний ефект оброблення: зменшується силова напруженість процесу різання і з'являється можливість підвищення міцності різального клину інструменту і його зносостійкості [215].
- Якщо порівняти характеристики якості обробленої поверхні при шліфуванні і точінні, то можна побачити, що за такими критеріями, як шорсткість точіння не поступається шліфуванню. Так, при точінні загартованих сталей різцями інструменту з CNB можна забезпечити шорсткість $Ra = 0,1$ мкм. За таким критерієм шорсткості, як відносна

опорна довжина профілю, шліфування суттєво поступається точінню. Порівняння залишкових напружень в поверхневих шарах обробленої поверхні після шліфування і точіння показує, що лезове оброблення стабільно забезпечує отримання сприятливих напружень стиску I роду, тоді як шліфування - несприятливих напружень розтягу, що негативно позначається на зносостійкості і контактній міцності загартованих деталей [140, 25].

Таким чином, варіант фінішного токарного оброблення функціональної поверхні виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 у порівнянні з шліфуванням алмазним кругом ACB 125/100 M5-2 є більш оптимальним за інтегральним кваліметричним показником, що системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, триботехнічну якість спряжень, корозійну стійкість та параметр забезпечення несучої здатності мастильного шару і отримується як результат формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень і деформацій.

Висновки до розділу 6.

1. В сучасному машинобудуванні особливу складність представляє виготовлення різних деталей штампів і прес-форм та ін. Це обумовлено їх високою точністю, низькою шорсткістю функціональних поверхонь, значними температурними флуктаціями в процесі експлуатації (до 500-700°C), складним (з точки зору його оброблюваності) матеріалом цих деталей, високою частотою та інтенсивністю циклічних та знакозмінних термічних та силових навантажень тощо. Тому для демонстрації переваг ефективності функціонально-орієнтованого технологічного проектування об'єктом дослідження на адекватність вибрано формування проектних технологічних рішень рівня маршрутно-операційної технології виготовлення виштовхувачів прес-форм. При експлуатації саме цей елемент конструкції підлягає інтенсивному зношуванню і знакозмінним силовим та термічним навантаженням, які у поєднанні здатні спричинити втрату функціональності прес-форми в цілому. Тому найбільш важливими експлуатаційними властивостями виштовхувачів є зносостійкість, контактна жорсткість, втомна міцність та корозійна стійкість (запобігання корозійному мікророзтріскуванню). Перелічені вище експлуатаційні властивості істотно залежать від таких показників якості поверхні, як мікротопологія функціональних поверхонь, мікротвердість (твердість поверхневого шару), залишкові напруження та деформації, їх характер та глибина залягання. Показники якості робочої поверхні формуються, в основному, на завершальній стадії процесу виготовлення виштовхувача, що включає чистові і фінішні операції. В дисертації розглянуто реалізацію 2-х варіантів маршруту оброблення найбільш точних циліндричних поверхонь виштовхувачів на фінішній операції: викінчувальне шліфування абразивним кругом та тонке точіння лезовим інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025.

2. Проведено імітаційно-аналітичний аналіз впливу технологічних чинників на напружено-деформований та структурно-фазовий стан функціональних поверхонь виштовхувача прес-форм в системі Deform-2D. В моделі використовувалися: тип моделювання – Lagrangian Incremental (Аналіз Лагранжа) з градієнтною сіткою

(коефіцієнт розрідження - 0,1); приведена геометрія об'єкта моделювання – Plane Strain; тип об'єктів моделювання : заготовка – Elasto-Plastic; інструмент – Rigid; метод рішення ітераційних задач – Newton-Raphson (метод Ньютона-Рафсена); умова збіжності розрахунку – Conjugate-Gradient Solver (метод об'єднаного градієнта); умова текучості матеріалу – Generalized Johnson&Cook Model (узагальнена модель Джонсона-Кука); критерій руйнування – Normalized C&L Fracture (нормалізований енергетичний критерій Кокрофта-Лейтема); модель структурно-фазових перетворень – Avrami model (модель Аврамі).

3. На основі імітаційно-аналітичного аналізу тонкого точіння функціональних поверхонь деталі лезовим з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 розраховані складові мікропрофілю обробленої поверхні, що одержується як результат копіювання різального клину інструмента з урахуванням кінематичних характеристик його руху ($\Delta_1 = 0,625$ мкм), висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту ($\Delta_2 = 0,39$ мкм) та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки ($\Delta_3 = 0,13$ мкм). Отже, для даного дослідження середні значення висоти мікронерівностей, що одержується як результат копіювання різального клину інструмента з урахуванням кінематичних характеристик його руху (Δ_1) становлять 55,5%, висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту (Δ_2) – 34,7% та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні різання (Δ_3) – 9,8%, відповідно. Таким чином, $Ra = 0,625 + 0,39 + 0,13 = 1,125$ мкм, що відповідає технічним умовам креслення (задане $Ra = 1,25$ мкм).

4. Графічно-аналітична залежність залишкових напружень I роду відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (температурних та фрикційних) та стискаючих (силових) навантажень. Ці напруження експотенційно зменшуються в результаті термодинамічної релаксації із зростанням віддалі від вершини різального клину вздовж обробленої поверхні. Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (при температурі

близько 100°C) складатиме приблизно 155 МПа при обробленні заготовки виштовхувача, виготовленого зі сталі 3X2B8Ф інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025.

5. Проведене моделювання залишкових напружень II роду в середовищі Deform NT2. В результаті реологічного моделювання фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3X2B8Ф) інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 отримані хромограми об'ємного фазового стану матеріалу. В даному випадку приймаємо, що «білий шар» має первинну мартенситну структуру з базовою твердістю 65HRC і становить не менше 68% фазового об'єму матеріалу. Мікротвердість «білого шару» становить 9,0-10 ГПа. Інший об'єм (менше 32%) заповнює трооститна структурна фаза з базовою твердістю близько 40HRC. Ця зона містить переважно феритно-карбідну фазу, але з пониженим вмістом вуглецю, хрому і інших карбідотвірних елементів. За результатами реологічного аналізу, на поверхні заготовки об'ємна фаза становить лише $\zeta_M = 0,45 \dots 0,47$ (45-47%), що заперечує утворення «білого шару». За формулою Меггі [51] $\zeta_M = 0,395$ (39,5%). Похибка імітаційного і розрахункового значення не перевищує в даному випадку 12,5%, що є цілком сприйнятливим для підтвердження адекватності моделювання. У цьому випадку значення залишкового напруження II роду на поверхні деталі становить лише $\sigma_\phi \approx 5,5$ МПа. Це, в першу чергу, обумовлено низькою температурою в зоні різання, що не сприяє фазовим перетворенням, а, отже, і не створює суттєвих залишкових напружень II роду. Ці дослідження ще раз підтверджують відомі експериментально доведені твердження [259, 299], що оброблення низько- та середньовуглецевих сталей при дуотермічному механізмі формування стружки при лезовому обробленні, повністю анігілює механізм утворення «білого шару» і не має суттєвого впливу на формування залишкових деформацій II роду.

6. Проведені дослідження для визначення залишкових деформацій на 2D моделі технологічного переходу фінішного токарного оброблення виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки

CB7025. Середньостатистичне значення поверхневих залишкових деформацій в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно $\varepsilon \approx 2,28$ (мм/мм) при фінішному токарному обробленні виштовхувача прес-форми (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв). Аналіз показників залишкових деформацій в глибині їх залягання доводить експотенційний характер зменшення цих деформацій: якщо на поверхні деталі ця величина становила $\varepsilon \approx 2,35$ (мм/мм), то на глибині 0,05 мм – вже $\varepsilon \approx 0,37$, а на глибині 0,12 мм деформація практично анігілюється і становить лише $\varepsilon \approx 0,03$ (мм/мм). Якісний та кількісний характер розподілу деформацій доводить адекватність та ефективність запропонованих методик для формування аналітичної бази при побудові функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

7. На основі аналізу результати аналітичних досліджень в системі Deform2D та середньостатистичних результати експериментальних та виробничих досліджень на базовому підприємстві (ТЗОВ «ІнтерПЕТ») наведені порівняльні характеристики альтернативних варіантів фінішного оброблення виштовхувача прес-форми (матеріал заготовки - сталь 3X2B8Ф): токарного оброблення інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 та викінчувального шліфування алмазним кругом на металічній зв'язці ACB 125/100 M5-2 (режими різання $V_k=31$ м/с, $t=0,01$ мм, $S_n=6$ м/хв, ширина круга $B=10$ мм).

8. Аналітично доведено, що в умовах пружного контакту інтенсивність зношування залежить від топології мікрогеометричних характеристик спряжених поверхонь ($b, v, Rvk, Rpk, Rk, Rmax, tm$), механічних властивостей матеріалів ($\sigma_t, \sigma_b, \sigma_{0,2}, E, \mu$), коефіцієнта тертя f , втомної характеристики t і тисків - номінального P_a і контурного P_c . Проте, відносний показник зносостійкості $K(I_h)$, який характеризує зміну інтенсивності зношування в залежності від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу визначається лише коефіцієнтом λ , що враховує вплив поверхневих залишкових напружень на інтенсивність зношування, та параметром

ступеневої апроксимації кривої Аббота ν :
$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\sqrt{\nu_2}(\nu_2^2 - 1) \cdot \lambda_1}{\sqrt{\nu_1}(\nu_1^2 - 1) \cdot \lambda_2}.$$

Порівнюючи фінішне токарне оброблення виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв) та його шліфування алмазним кругом АСВ 125/100 М5-2 (режими різання $V_k=31$ м/с, $t=0,01$ мм, $S_n=6$ м/хв), отримуємо відносний показник зносостійкості $K(I_h)=0,86$. Тобто, в результаті зміни структури технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми зносостійкість функціональної поверхні зростає приблизно на 14% внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні та зміни характеру та номінальних значень залишкових напружень.

9. Загальний вплив на коефіцієнт запасу втомної міцності n_{-1} мають ряд конструкторсько-технологічних чинників, серед яких лише коефіцієнт впливу шорсткості поверхні n_{BR} та коефіцієнт впливу залишкових деформацій n_{eZ} , що виникли в результаті механічного оброблення деталі, залежать від якості поверхневого шару виробу, на формування якого впливає структура та параметри технологічного процесу його виготовлення. Слід зауважити, що за результатами аналітичних досліджень в системі Deform2D та середньостатистичними результатами експериментальних та виробничих досліджень на ТЗОВ «ІнтерПЕТ» при шліфуванні на поверхні заготовки розвиваються залишкові напруження розтягу ($\sigma_{зал} \approx -130$ МПа), а при лезовому обробленні формуються залишкові напруження стиску ($\sigma_{зал} \approx +150$ МПа). Відносний показник втомної міцності, що характеризує зміну коефіцієнту запасу втомної міцності n_{-1} в залежності від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою

$$K(n_{-1}) = \frac{n_{BR_1} \cdot n_{eZ_1}}{n_{BR_2} \cdot n_{eZ_2}} = 1,43.$$
 Тобто, в результаті зміни структури технологічного

процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми втомна міцність

функціональної поверхні зростає приблизно на 43% внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні та зміни характеру та номінальних значень залишкових напружень.

10. Відносний показник швидкості фретинг-корозійного руйнування $K(\tau)$ перш за все залежить від висоти виступів мікронерівностей профілю $(Rpk + Rk)$ і розраховується за формулою $K(\tau) = \frac{(Rpk_1 + Rk_1)}{(Rpk_2 + Rk_2)} = 1,07$. Тобто, в результаті зміни

структури технологічного процесу фінішного оброблення виштовхувача прес-форми інтенсивність фретинг-корозії функціональної поверхні зростає приблизно на 7% внаслідок зміни сформованої мікротопології поверхні.

11. Оскільки одним з найважливіших критеріїв працездатності рухомих з'єднань є дотримання режиму рідинного тертя між спряженими поверхнями деталей шляхом забезпечення мінімальної товщини мастильної плівки в зоні їх трибоконтракту, слід розглянути в якості критерію ефективності функціонально-орієнтованого технологічного процесу, забезпечення несучої здатності плівки, що може бути втрачена внаслідок надмірного навантаження опори при недостатній швидкості ковзання або внаслідок теплового руйнування. Відносний показник коефіцієнту надійності роботи механічної системи в режимі рідинного трибоконтракту залежить, перш за все, від величини мікрозападин Rvk , що являють собою т.зв. «мастильні кишені» і визначається за формулою $K(S) = \frac{Rvk_1}{Rvk_2} = 0,94$.

12. Триботехнічна якість спряжень визначається енергетичними втратами на тертя в спряжених поверхнях деталей машин. Відносний показник $K(f)$, що характеризує зміну коефіцієнта тертя у спряженій трибопарі в залежності від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою

$$K(f) = \sqrt{\frac{\Delta_1}{\Delta_2}} = 0,5.$$

13. Розрахунок нормалізованих локальних критеріїв оптимізації за

кваліметричними показниками для фінішного токарного оброблення функціональної поверхні виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 (режими різання: $S=0,05$ мм; $t=0,12$ мм; $V=50,2$ м/хв) виконується за наведеним в дисертаційній роботі алгоритмом і становить для даного прикладу за відносними показниками зносостійкості $Q1 = 0,28$; за коефіцієнтом запасу втомної міцності $Q2 = 0,30$; за параметром триботехнічної якості спряжень $Q3 = 0,10$; за параметром корозійної стійкості $Q4 = -0,14$; за коефіцієнтом запасу рідинного трибоконтакту $Q5 = -0,17$. Остаточною узагальненою критерією оптимізації, дорівнює $F_1 = 0,383$. Таким чином, варіант фінішного токарного оброблення функціональної поверхні виштовхувача прес-форми інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки CB7025 у порівнянні з шліфуванням алмазним кругом ACB 125/100 M5-2 є більш оптимальним за інтегральним кваліметричним показником, що системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, триботехнічну якість спряжень, корозійну стійкість та параметр забезпечення несучої здатності мастильного шару і отримується як результат формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень і деформацій.

14. В результаті проведених досліджень доведена адекватність результатів аналітичного та імітаційного моделювання реальним процесам. Показано, що формування функціонально-орієнтованого технологічного процесу створює передумови забезпечення більш ефективної експлуатаційної якості виробів машинобудування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану технологічного забезпечення інтегрованих систем автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва показав, що для всіх найбільш розповсюджених САПР середнього і верхнього класу складності є характерною системна інтеграція корпоративних CAD/CAE/CAPP/CAM програмних продуктів на основі впровадження концепції системного забезпечення життєвого циклу виробів машинобудування (*PLM*-системи). Традиційна методологія побудови технологічного етапу інтегрованої комплексно-автоматизованої системи технологічної підготовки автоматизованого виробництва, що базується на послідовному безітераційному синтезі операцій та переходів, потребує структурного та методологічного вдосконалення. Особливо важливим є необхідність врахування умов експлуатації найбільш навантажених деталей у виробі не лише на стадії конструювання та призначення норм точності виробів, але й на етапі проектування технології їх виготовлення. Для цього до складу інтегрованої CAD/CAE/CAPP/CAM-системи необхідно додати автоматизовану систему, що реалізує взаємозв'язок між технологією формоутворення виробів з умовами їх потенційної експлуатації (*Computer Aided Forming* – CAF-система). У основі цієї системи покладений аналіз реологічної імітаційної моделі окремих технологічних переходів і комплекс функціональних модулів і аналітичних додатків формування точнісних, термодформаційних, мікрогеометричних і структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

2. Особливістю нової методології технологічної підготовки виробництва, яка базується на принципах паралельності та ітераційності взаємопов'язаних крос-функціональних процесів і реалізує *PLM*-концепцію, забезпечуючи, таким чином, увесь життєвий цикл виробу, є проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування. При виборі оптимального функціонально-орієнтованого технологічного процесу функцією мети є інтегральний кваліметричний показник, який системно характеризує комплекс експлуатаційних характеристик, що формуються на основі аналізу

мікротопології поверхневого шару поверхонь, залишкових напружень та деформацій, отриманих в процесі формоутворення виробу.

3. Впровадження функціонально-орієнтованого технологічного проектування ставить задачу суттєвого вдосконалення існуючої методології об'єктно-орієнтованої конструкторсько-технологічної підготовки виробництва шляхом розроблення нових методів прогнозування якості життєвого циклу виробів на етапі технологічної підготовки машинобудівного виробництва. Тому очевидним є актуальність розроблення адекватних методів моделювання як мікрогеометричних, так і напружено-деформаційних параметрів оброблення деталей з наступним аналізом у спеціалізованій САЕ-системі їх впливу на функціональні властивості окремих поверхонь та виробу в цілому в умовах його потенційної експлуатації.

4. Методологія функціонально-орієнтованого проектування базується на системі паралельного інжинірингу CAPE (*Concurrent Art-to-Product Environment* - системі підтримки паралельного проектування (*Concurrent engineering*)). При цьому, засобами паралельного інжинірингу можна реалізувати рекурентний і ітераційний взаємозв'язок крос-функціональних етапів технологічної підготовки виробництва: 3D моделювання виробів (CAD-система), імітації та прогнозуючого їх дослідження в умовах потенційної експлуатації (CAE-система), пресинтез структури і параметрів технології виготовлення (CAPP-система), моделювання мікрогеометричних та залишкових напружено-деформаційних параметрів формоутворення функціонально-важливих поверхонь виробу (CAF-система) і програмування механічної обробки на верстатах з ЧПК (CAM-система).

5. У базових програмних продуктах CAF-системи реалізовані явний і неявний метод кінцевих елементів з можливістю побудови лагранжевої, ейлерової і гібридної сітки, багатокomпонентна гідродинаміка, метод згладжених ґраток, оснований на методі Галеркіна. В дисертаційній роботі наведений аналіз вибору найбільш адекватних критеріїв руйнування в залежності від матеріалу деталі та умов її формоутворення.

6. Проблемно-орієнтоване узагальнення та акцентовані висновки досліджень в САФ-системі впливу технологічних показників – подачі, швидкості, глибини різання, геометрії інструменту на напружено-деформаційний та термодинамічний стан поверхневого шару заготовки дозволяють створити базу даних для формалізації прогностичної залежності найважливіших експлуатаційних характеристик виробу від структури та параметрів технологічного процесу його виготовлення. У зв'язку з цим, у дисертаційній роботі була проведена верифікація змодельованих напружено-деформаційних та термодинамічних процесів, що супроводжують формоутворення поверхонь для найбільш репрезентативних матеріалів, які використовуються у сучасному машинобудуванні та для різних параметрів геометрії лезового інструмента. Співставлення результатів досліджень відомих положень теорії різання з результатами реологічного імітаційного моделювання довело адекватність та ефективність використання автоматизованої системи формоутворення для реалізації функціонально-орієнтованого технологічного проектування.

7. На основі аналізу сучасних наукових досліджень з інженерії поверхонь встановлено, що на сьогоднішній день ще остаточно не розроблені методики розрахунку параметрів мікронерівності поверхні з урахуванням пластично-деформаційних та вібраційних процесів, що здійснюються в процесі формоутворення деталей. Існуючі методики базуються, як правило, на розрахунку тільки геометрико-кінематичної складової мікронерівності. У цьому випадку процес формування параметру шорсткості прийнято трактувати лише як копіювання на оброблюваній поверхні траєкторії руху і форми різальних лез. Загалом же, мікрорельєф обробленої поверхні утворюється в результаті векторного додавання висоти мікронерівностей, одержуваної в процесі копіювання різальної частини інструмента з урахуванням кінематичних характеристик її руху, висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями елементів різального інструменту та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки. Причому результати врахування деформаційної та вібраційної

складової мікронерівності, що залежать, в основному, від результатів експериментальних досліджень, не завжди коректно описують фізичну суть явищ і тому мають вузькі межі застосування. Ці залежності не відображають динамічної і кінематичної суті процесу формування поверхні. Крім того, для забезпечення більшості експлуатаційних властивостей виробів важливо знати не тільки інтегральні висотні характеристики мікронерівностей, але й топологію їх розподілу по виступах та впадинах, крокові параметри тощо. Так, параметр R_{pk} дозволяє визначити величину зношування матеріалу в процесі припрацювання, параметр R_k найсуттєвіше впливає на допустиме зношування найбільш відповідальної функціональної поверхні, а параметр R_{vk} відображає здатність поверхні до утримування мастила тощо. Таким чином, для формування функціонально-орієнтованого технологічного процесу розроблений новий підхід до визначення параметрів шорсткості поверхні, що ґрунтується на фундаментальних положеннях теорії коливань, кінематики і динаміки процесу різання з врахуванням результатів імітаційного реологічного моделювання процесів формоутворення функціональних поверхонь виробів.

8. Використання розробленої в дисертаційній роботі методиці на основі аналізу результатів реологічного імітаційного моделювання в САФ-системі дозволяє встановити величини залишкових напружень, глибину їх залягання і закон розподілу. Інтерферентні залишкові напруження I роду є складноформалізованими, багатофакторними величинами, оскільки відображають інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (фрикційних) та стискуючих (силових) навантажень та динамічну картину глибинних термічних впливів процесу формоутворення. Тому можливості імітаційного реологічного моделювання – це єдиний шлях оперативного та адекватного аналізу впливу технологічних параметрів різання (структури технологічного переходу, режимів оброблення, вибору зовнішнього технологічного середовища тощо) на формування залишкових напружень та деформацій.

9. Аналіз імітаційних реологічних досліджень механізму виникнення та формування напружень II роду, що виникають внаслідок лезового оброблення

конструкційних матеріалів, дозволив зробити наступні висновки: отримані результати реологічного моделювання цілком корелюються з експериментальними даними та величинами, наведеними в наукових літературних джерелах; значущі результати напружень II роду можуть бути отримані тільки в результаті інтенсивного лезового оброблення на високих швидкостях і лише для матеріалів з метастабільною структурою.

10. Розроблений в дисертаційній роботі алгоритм структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу передбачає виконання етапу моделювання та аналізу напружено-деформованого стану виробу в процесі його формоутворення, реалізований в САF-системі та етапів розрахунку технологічної складової локальних критеріїв - інтенсивності зношування функціональних поверхонь, коефіцієнту запасу за показником втомної міцності, показника динамічної якості трибоспряжень, коефіцієнту запасу рідинного трибоконтакту функціональних поверхонь деталі та параметру корозійної стійкості (фретінг-корозії) в умовах потенційного функціонування виробу в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь. Вибір оптимального структурно-параметричного варіанту функціонально-орієнтованого технологічного процесу виконується за системним кваліметричним критерієм.

11. На основі аналізу результатів аналітичних досліджень в системі Deform2D та середньостатистичних результатів експериментальних та виробничих досліджень на базовому підприємстві «ІнтерПЕТ» наведені порівняльні характеристики альтернативних варіантів фінішного оброблення виштовхувача прес-форми: токарного оброблення лезовим інструментом з пластинкою з керамічного композиту на основі CBN та викінчувального шліфування алмазним кругом на металічній зв'язці. В результаті проведених досліджень доведена адекватність результатів аналітичного та імітаційного моделювання реальним процесам. Показано, що формування функціонально-орієнтованого технологічного процесу створює передумови забезпечення більш ефективної експлуатаційної якості виробів машинобудування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Altintas Y. Manufacturing automation / Y.Altintas. - Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 286 p.
2. ANSI/EIA-632-1999. Process for Engineering a System. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://acc.dau.mil>.
3. APICS — The association for operations management. [Електронний ресурс]: сайт компанії, 2009. - Режим доступу: <http://www.apics.org>.
4. Ayada T. Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials / T.Ayada, M.Higashino, K.Mori. - Proceedings of 1-st ICTP. Advanced Technology of Plasticity.- 1984, Vol.1.- pp. 553-558.
5. Balakrishna A. Integration of CAD/CAM/CAE in Product Development System Using STEP/XML / A. Balakrishna, R. Suresh Babu, D. Nageswara Rao, Ranga Raju, Sudhakar Kolli // Concurrent Engineering , 2006 .- Vol.14, №2.- pp.121-128.
6. Brozzo P. A new method for the prediction of formability limits of metal sheets // P.Brozzo, B. Deluca, R. Rendina.- London: Proceedings of the 7th Congress of International Deep Drawing Research Group, 1972.- pp. 79-94.
7. CMU/SEI-2006-TR-008. CMMI for Development, Version 1.2. [Електронний ресурс] : Pittsburg: Carnegie Mellon University, 2006. – 561 p. - Режим доступу: <http://www.sei.cmu.edu>.
8. CMU/SEI-2007-TR-017. CMMI for Acquisition, Version 1.2. -, [Електронний ресурс] : Pittsburg: Carnegie Mellon University, 2007. – 429 p. - Режим доступу: <http://www.sei.cmu.edu>.
9. Cenk Kiliçaslan. Modelling and simulation of metal cutting by finite element method / Cenk Kiliçaslan.- İzmir: İzmir Institute of Technology, 2009. – 86 p.
10. Cockroft M.G. Ductility and Workability of Metals / M.G. Cockroft, D.J.Latham.- London: Inst. Metals.- Vol.96.- pp. 33-39.

11. Davim J. P. Machining of Hard Materials/ Davim J. P.- London: Springer, 2011.- 225 p.
12. Davim J. P. Surface Integrity in Machining / Davim J. P.- London: Springer-Verlag, 2011.- 215 p.
13. Diactu E. The Computer Aided Design Concept in the Concurrent Engineering Context / Diactu E., Armas I.- Nanyang: Nanyang Technological University, School of Mechanical and Aerospace Engineering, 2011.-Vol .2.- pp. 29 – 38.
14. ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering - Software life cycle processes. [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.iso.org>.
15. ISO/IEC 15288:2008 Systems and software engineering - System life cycle processes. [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.iso.org>.
16. ISO/IEC 15939: 2007 Systems and software engineering - Measurement process. [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.iso.org>.
17. ISO/IEC 16085: 2006 Systems and software engineering - Life cycle processes - Risk management/ [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.iso.org>.
18. ISO/IEC 26702: 2007 Systems engineering - Application and management of the systems engineering process/ [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.iso.org>.
19. ISO/IEC 4287:1997 Surface roughness/ [Электронный ресурс] : Режим доступа: <http://www.iso.org>.
20. Faassen R.P.H. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling/ R.P.H.Faassen, N.Van de Wouw, J.A.J.Oosterling, H.Nijmeijer.-Amsterdam: Elsevier // International Journal of Machine Tools & Manufacture.- 2003.- №43.- pp.1437–1446.
21. Fortunier R. A numerical model for multiple phase transformations in steels during thermal processes / R.Fortunier, J.B.Leblood, J.M.Bergheau.- Shanghai: Shanghai Jiaotong Un. 2000.- Vol.5, №1.- 213 p.

22. Freudenthal A.M. The inelastic behavior of engineering metals and structures / A.M.Freudenthal.- New York: Wiley, 1950 .- 160 p.
23. Gradisek J. A Chaotic Cutting Process And Determining Optimal Cutting Parameter Values Using Neural Networks / J.Gradisek, E.Govekar , I.Grabec - Amsterdam: Elsevier // International Journal of Machine Tools & Manufacture.- 1996.- vol. 36.- pp. 1161-1172.
24. Griffiths B.J. Mechanisms of White Layer Generation with Reference to Machining and Deformation Processes, Transactions of the ASME / Griffiths B.J. // Journal of Tribology.- 1987.- Vol. 109.- p.535-530.
25. Harinderpal Singh. Analysis of Surface Roughness and Waviness During Diamond Turning of Polycarbonate / Harinderpal Singh, O. Rahul, Karanvir Sing , Vinod Mishra , Ramagopal V Sarepaka// International Journal of Scientific Research. Delhi.- 2013.- Vol. 2, №6 .- p. 268-270
26. Han S. Mechanism and Modeling of White Layer Formation in Orthogonal Machining of Steels Doctoral Dissertation/ S.Han.- Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2006.- 124 p.
27. Hill K. The Mathematical Theory of Plasticity / K.Hill.- Oxford: Clarendon Press, 1990.- 396 p.
28. Jerard R. On-Line Optimization of Cutting Condition for NC Machining / R.Jerard, B.Fussel, M.Ercan // 2001 NSF Design, Manufacturing & Industrial Innovation Conference.- Florida, 2001. – pp.1-11.
29. Jemelniak K. Numerical simulation of non - linear chatter vibration in turning, / K.Jemelniak, A.Widota.- Amsterdam: Elsevier // International Journal of Machine Tools & Manufacture.- 1989.- vol. 29, №2.- pp. 239-247.
30. Johnson G.R. High velocity impact calculation in three dimensions Johnson G.R. // J. Appl. Mech. -1977.- Vol. 4.- №3. - P. 95-100.
31. Kaneko T. Self - excited chatter and its marks in turning / T.Kaneko, H.Sato, Y.Tani // Trans. ASME J. Engng. Ind.- 1984.-vol. 106.- pp. 222-228,.
32. Kazincy L. Tehoretische Bestimmung der Zerspankraft beim Drehen / L. Kazincy .- 1972.- Vol.94, N 5.- pp.59-82.

33. Kleiber M. Incremental Finite Element Modeling in Non-Linear Solid Mechanics / M. Kleiber.- New York: John Wiley & Sons, 1989. - pp. 379-384.
34. Klocke F. Development of a Material Damage Model for the Prediction of Chip Breakage / F.Klocke, D.Lung, C.Essig, M.Abouridouane// Proceedings of The 10th International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2011).- Aachen.- 2011.- P.612-617
35. Klocke F. Manufacturing Processes: Cutting / F.Klocke.- Berlin: Springer-Verlag, 2011.- 504 p.
36. Klocke F. Examples of FEM application in manufacturing technology / F. Klocke, T. Beck, S. Hoppe, T. Krieg. J// Mat. Proc. Technol.- 2002.- Vol. 120.- pp. 450-45.
37. Kondo Y. Behavior of self - excited chatter due to multiple regenerative effect / Y.Kondo, O.Kawano , H.Sato // Trans. ASME J. Engng. Ind.- 1981.- vol. 103.- pp. 324-329.
38. Kovačić I. The chatter vibrations in metal cutting -theoretical approach. Mechanical engineering / I.Kovačić.- Journal Facta Universitatis . - 1998.- Vol.1, №5.- 581- 593.
39. Kovac P. A Review To Advanced Modeling And Simulation Of Machining Process / P.Kovac, M.Gostimirivic, M.Sekulic, B.Savkovic // International Journal of Production Engineering.- 2002.- Vol. 12, №.1.- pp. 17-22.
40. Lee B.Y. Modeling of the process damping force in chatter vibration / B.Y.Lee, Y.S.Tarng, S.C.Ma.- Amsterdam: Elsevier // International Journal of Machine Tools & Manufacture.- 1995.- vol. 35, № 7.- pp. 951-962.
41. Leile H. Systematik der Fließspannbildung / H.Leile , I.Teil // Techn. Zbl. prakt. Metallbearb.- 1974.- Vol.68, N 5.- pp.175—178.
42. Majumdar A. Characterization and modeling of surface roughness and contact mechanics // A.Majumdar, B.Bhushan // Handbook of Micro/Nanotribology.- 1999.- Chapter 4.- pp.45-56.
43. McClintock F.A. A criterion for ductile fracture by the growth of holes/ F.A.McClintock // Journal of Applied Mechanics.- 1968.- pp. 363-371.

44. Merrit H.E. Theory of self - excited machine tool chatter / H.E.Merrit // Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME. Series B.- 1965.- Vol. 87, N. 4.- pp.447-454.
45. Mikhailov A.N. Synthèse des macro-, micro- et nanotechnologies dans des constructions mécaniques / A.N. Mikhailov // Recueil des exposés des participants de la V Conférence internationale scientifique et méthodique à Tabarka.- 2011. – Donetsk: UNTD, 2011. – pp. 27–33.
46. Osakada K. Ductile Fracture of Carbon's steel under Cold Metal Forming Conditions: Tension and Torsion Tests Under Pressure / K.Osakada, A.Watadaru H.Sekiguchi // Bulletin of TSME.- 1977.- Vol. 20.- pp. 1557-1565.
47. Oxley P. L. Mechanics of machining: An analytical approach to assessing machinability/ P. L.Oxley. - London: Ellis Harwood Limited, 1989.-242 p.
48. Oyane M. Criteria of ductile fracture strain / M.Oyane // Bulletin of TSME.- 1972.- Vol. 15.- pp. 1320-1341.
49. Persson B. On The Nature Of Surface Roughness With Application To Contact Mechanics, Sealing, Rubber Friction And Adhesion/ B.Persson, O. Albohr // Journal of Physics: Condensed Matter.- 2005.- Vol.17.- pp.15-24.
50. Ramesh A. Prediction of Process-Induced Microstructural Changes and Residual Stresses in Orthogonal Hard Machining / A.Ramesh.- Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2002.- 135 p.
51. Ramesh A. White Layer Formation in Machining of Hardened Steel: Experiments and Modeling / A.Ramesh, S.N.Melkote .- Singapore: Dojyo on High Speed Machining of Hard/Super Hard Materials, JSME.- 2003.- 52 p.
52. Rice J. R. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields / J.R. Rice, D.M.Tracey // Journal of the Mechanics and Physics of Solids.- 1969.- Vol. 17.- pp. 201-217.
53. Beardsley S. A Critical Enabler of Managerial Innovation. / S.Beardsley, I.Beyer von Morgenstern, L.Enriquez, S.Mytilineos, J. Wunram // Materials XXXXV World Economic Forum. Chapter 4. The Business Dimension ICT.- Davos.- 2008.- p.58-73.

54. Sevier M. Severe Plastic Deformation by Machining Characterized by Finite Element Simulation / M.Sevier, H.T.Y.Yang, S.Lee, S.Chandrasekar // Metallurgical and Materials Transactions A: Springer, 2006.- vol. 34. - pp. 1158-1163.
55. Sheng I. Modeling Welding by Surface Healing/ I.Sheng, , Y.Chen // Journal of Engineering Materials and Technology.- 1992.- N.114.- pp.439-448.
56. Shi H.M. Theory of finite amplitude machine tool instability / H.M.Shi, S.A.Tobias // International Journal of Machine Tools and Manufacture.- 1984.-vol. 24.- pp. 45-69
57. Smith G. Cutting Tool Technology: Industrial Handbook / G.Smith.- London: Springer, 2008.- 559 p.
58. Stephen D. Superplastic Forming and Diffusion Bonding of Titanium/ D.Stephen // The Institute of Metals. - London, 1986. - P. 108—125.
59. The Standish Group International, Inc. [Електронний ресурс]: сайт компанії. 2009. — Режим доступу : <http://www.standishgroup.com>.
60. Stupnytskyy V. Subsystem of rheological forming modeling in integrated CAD/CAPP/CAM system in machine building/ V.Stupnytskyy // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика».- Львів.- 2012, №747.– С. 139-142.
61. Stupnytskyy V. Use of the CAF-system (Computer Aided Forming) in Integer Computer Aided Manufacturing / V.Stupnytskyy // Papers of the XX Ukrainian-Polish Conference on CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues – CADMD.- 2012.- pp.45-48
62. Stupnytskyy V. New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering / V.Stupnytskyy // Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing.- Stuttgart.- 2012.- № 1.- pp.327-329.
63. Stupnytskyy V. Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering / V.Stupnytskyy // Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. 2013.- Stuttgart.- № 3 (Maart).- Section 1.- Vol. 2.- pp.50-53.

64. Stupnytskyy V. Thermal factors influence on rheological state of machining part in chip forming zone / V.Stupnytskyy // Acta Universitatis Pontica Euxinus, Varna, Bulgary (Proceeding of IX International Conference “Strategy of quality in industry and education”).- 2013 – Vol.1.- P.136-139.

65. Stupnytskyy V. Principles of functional-oriented technology manufacturing products engineering production / V.Stupnytskyy // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”.- 2013, №760.- С. 26-34.

66. Stupnytskyy V. Mathematical model of destruction kinetics dislocations in cutting plastoelastic workpiece material / V.Stupnytskyy // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів».- Львів.- 2013, №759.– С. 119-126.

67. Stupnytskyy V. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment / V.Stupnytskyy // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).- 2013.- Vol. 2, Issue 9. –P.1181-1186.

68. Stupnytskyy V. Planning features of function-oriented technology engineering production / V.Stupnytskyy // Scientific Potential.- Elkraft, Indiana, Vol. 1, Issue 1.- P.60-64.

69. Stupnytskyy V. Thermodynamic Pattern of the Workpiece Machining by the Rheological Imitation Modelling in Deform-3D System / V.Stupnytskyy // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”.- Львів.- 2013, №772.- с. 102 - 114

70. Stupnytskyy V. Determination of deformation component roughness parameters using the methods of rheological simulation modeling of the cutting process / V.Stupnytskyy, A.Kuk // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences.- «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH.- Vienna.- 2014, № 3 (May–Jun), Section 4. - p.33-37.

71. Stupnytskyy V. A Generalized Example of Structural and Parametric Optimization of Functionally-Oriented Process / V.Stupnytskyy // Вісник

Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 42 (1085). - с. 116-130.

72. Surhone L. Pareto analysis: Statistics, decision making, Pareto principle, fault tree analysis, failure mode and effects analysis. Pareto distribution / L.Surhone, , M.Timpledon, S. Marseken. [Електронний ресурс].- 2010.- Wikipedia Betascript Publishing.

73. Tarng Y.S. An Analytical Model of Chatter Vibration in Metal Cutting / Y.S.Tarng, H.T. Young, B.Y.Lee // International Journal of Machine Tools and Manufacture.- 1994.- Vol. 34, N.2.- pp. 183-197.

74. Thamizhmanii S. Rosli A Study Of Minimum Quantity Lubrication On Inconel 718 Steel./ Thamizhmanii S. Rosli , S.Hasan// International Scientific Journal (IJERT), 2009.- N39.- pp. 38-44.

75. Ulutan D. Machining Induced Surface Integrity In Titanium And Nickel Alloys: A review / D.Ulutan, T. Ozel// International Journal of Machine Tools & Manufacture.- 2011. № 51.- pp.31-42.

76. Maus W. Simulation as tool in high pressure die casting processes / W.Maus, H.Rockmair, R.Seefeldt.- Berlin: MAGMA.- 2002.- 23 p.

77. Yoshimura M. System Design Optimization for Product Manufacturing [Текст] / Masataka Yoshimura// Concurrent Engineering.- 2007.- Vol. 15(4). – pp. 329-343.

78. Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов в САПР ТП / В.И. Аверченков.- Брянск: БИТМ, 1987. - 108 с.

79. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / [В.С.Корсаков, Н.М.Капустин, К.Х.Темпельгоф, Х.Лихтенберг]. – М.: Машиностроение, 1985. – 305 с.

80. Агамиров Л.В. Расчетное обоснование кривой усталости элементов конструкций на базе критерия подобия усталостного разрушения/ Л.В.Агамиров // Вестник машиностроения.- 2000.- №11.- С. 27-31.

81. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П.Алехин.- М.: Наука, 1983.- 279 с.

82. Армарево И.Дж.А. Обработка металлов резанием / И.Дж.А.Армарево, Р.Х.Браун.- М.: Машиностроение, 1977.- 325 с.
83. Афонин А.Н. Моделирование разрушения металлов при пластической деформации в DEFORM и LS-DYNA / А.Н.Афонин // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение.- 2012.- №1.- С. 52-62.
84. Бабкина Л.А. Основы систем автоматизированного проектирования / Л.А. Бабкина.- Красноярск: изд-во СибГТУ, 2009.- 51с.
85. Базаров И.П. Термодинамика / И.П.Базаров.- М.: Высшая школа, 1991. - 376 с.
86. Базров Б.М. Модульные технологии / Б.М.Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
87. Басов К.А. САТИА V5. Геометрическое моделирование / К.А.Басов.- СПб.: ДМК Пресс - Питер, 2008. — 270 с.
88. Безъязычный В. Ф. Назначение оптимальных режимов резания с учетом заданных параметров качества поверхностного слоя изделий / В.Ф.Безъязычный.- В кн.: Обработка металлов резанием.- М.: Знание МДНТП, 1977.- с. 86—89.
89. Безъязычный В. Ф. Расчет режимов резания / В. Ф.Безъязычный, И. Н.Аверьянов, А.В.Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.
90. Белецкий В.М. Алюминиевые: сплавы (Состав, свойства, технология, применение). [Справочник] / В. М. Белецкий, Г. А Кривов. Под общ. ред. И.Н.Фридляндера.- К.: Коминтех, 2005.- 365 с.
91. Беркович И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И.Беркович, Д.Г. Громаковский.- Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-т, 2000.- 268 с.
92. Бишутин С.Г. Инженерия поверхностей деталей машин, подвергаемых механической обработке / С.Г.Бишутин, О.Н.Федонин // Вестник Брянского государственного технического университета.- 2007.- № 1(13).- С.7-

93. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании / С.Г.Бишутин. – М.: Машиностроение, 2004. – 144с.
94. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф.Бобров.- М.: Машиностроение, 1975.- 344 с.
95. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А.А.Богатов.- Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ.- 2002.- 329 с.
96. Борисов А.А. Производство и эксплуатация современного режущего инструмента / А.А.Борисов, Г.В.Боровский, В.А.Гречишников.- М.: ИТО, 2011.- 104 с.
97. Бровкова М.Б. Системы искусственного интеллекта в машиностроении / Бровкова М.Б.- Саратов: Изд-во Саратов. гос. тех. ун-та, 2004.- 119 с.
98. Бурков П.В. Структурообразование, фазовый состав и свойства композиционных материалов на основе карбида титана / П.В.Бурков.- Томск: ТПУ, 2011.- 190 с.
99. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении / В.П.Быков. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.
100. Васильков Д.В. Динамика технологической системы механической обработки / Д.В.Васильков, В.Л.Вейц, В.С.Шевченко.- СПб.: Инструмент, 1997. - 230 с.
101. Васильков Д.В. Применение интегрированного конечноэлементного комплекса COSMOS/M к решению задач термоупругопластичности / Д.В.Васильков, Е.Б.Козлова // Машиностроение и автоматизация производства: Вып.4. - СПб.: СЗПИ. - 1996. - С. 122-130.
102. Васин С.А. Резание металлов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С.А.Васин, А.С.Верещака, В.С.Кушнер.- М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001.- 448 с.
103. Валетов В.А. Автоматизированная система непараметрической оценки микрогеометрии поверхности / В.А.Валетов, Д.В.Васильков,

А.В.Воронин // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. – СПб.: СЗПИ, 1995. - С. 54- 67.

104. Валетов В.А. Микрогеометрия поверхностей деталей и их функциональные свойства / В.А.Валетов, А.Ю.Иванов // Известия вузов. Приборостроение. - 2010. - Т. 53, №8. - С. 7-11.

105. Валетов В.А. Непараметрический подход к оценке качества изделий / В. А. Валетов, А. Ю. Иванов // Металлообработка. - 2010. - №6. - С. 55-59.

106. Вествуд А. Влияние среды на процесс разрушения / А.Вествуд // Разрушение твердых тел.- М.: Металлургия, 1967.- С. 344–399.

107. Вибрации в технике. Т.2 // Под редакцией М.Д. Генкина. – М.: Машиностроение, 1981. – 497с.

108. Владимиров В.И. Физическая теория пластичности и прочности / В.И.Владимиров.- Л.:Изд-во Ленинградского Политехнического института, 1975.- 151 с.

109. Власьевский С.В. Методика триботехнического исследования механических узлов подвижного состава в условиях низких температур / С.В.Власьевский.- Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008 .- 96 с.

110. Воробьев А.З. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З.Воробьев, Б.И.Олькин, В.Н.Стебнев, Т.С.Родченко.- М.: Машиностроение, 1990.- 239 с.

111. Вульф А.М. Резание металлов / А.М.Вульф. – М.: Машиностроение.- 1973.- 496 с.

112. Высогорец Я.В. САПР ТП «Вертикаль» / Я.В. Высогорец. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. – 48 с.

113. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т.А.Гаврилова, В.Ф.Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.

114. Гольдшмит М.Г. К расчету напряжений при резании с использованием динамических кривых упрочнения / М. Г. Гольдшмит // Вестник машиностроения. - 2002. - №1. - С. 44-46.

115. Гончаров П.С. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П.С.Гончаров, И.А.Артамонов, Т.Ф. Халитов. - М.: ДМК Пресс, 2012. - 504 с.
116. Горбунов И.В. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ системах / И.В. Горбунов, И.В. Ефременков, В.Л. Леонтьев, А.Р. Гисметулин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.- 2013.- Т.15, №4(4).- С. 846-853.
117. Грановский Г.И. Резание металлов / Г.И.Грановский, В.Г.Грановский. – М.: Высшая школа, 1985.- 304 с.
118. Грувер М. САПР и автоматизация производства / М.Грувер, Э.Зиммерс. – М.: Мир, 1987.- 528 с.
119. Гуд Г.-Х. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Г.-Х.Гуд, Р.-Э.Макол.- М.: Радио и связь, 1982. - 420 с.
120. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И.Гусев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 416 с.
121. Гутиря С.С. Застосування кваліметричних моделей для синтезу і діагностики трибомеханічних систем / С.С.Гутиря, О.Г.Дерев'янченко // Трибофатика: Праці симпозіуму ISTF'2002. — Тернопіль: ТДТУ, 2002. — С. 200 — 204
122. Гутиря С.С. Системное моделирование качества механизмов и машин / С.С.Гутиря // Одесса: Труды Одесского политехнического университета.- 2003. – Вып. 2 (20). – С. 14 – 21.
123. Де Гроот С. Р. Термодинамика необратимых процессов / С. Р. Де Гроот.- М.: Гос. Изд.-во техн.-теор. лит., 1956.- 280 с.
124. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д.Дель.- М.: Машиностроение, 1978. — 174 с.
125. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г.Д.Дель.- М.: Машиностроение, 1971.- 199 с.
126. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б.Демкин, Э.В.Рыжов.- М.: Машиностроение, 1981.- 224 с.

127. Дрозд М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / Д М.С.розд, М.М.Матлин, Ю.И.Сидякин. - М.: Машиностроение, 1986. - 224 с.
128. Друянов Б.А. Теория технологической пластичности / Б.А.Друянов, Р.И.Непершин.- М.: Машиностроение, 1990. - 272 с.
129. Лесников Е. САТІАV5 – настоящее и перспективы / Е.Лесников // CAD/CAM/CAE Observer.- 2004.- № 1 (14).- С.7 - 11.
130. Евгениев Г. Б. Интеллектуальные системы проектирования / Г.Б. Евгениев. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 334 с.
131. Евдокимов В.В. Экономическая информатика // Под ред. В.В.Евдокимова. – СПб.: Питер, 1997. – 592 с.
132. Евсин Е.А. Информационные технологии в научных и инженерных разработках. Представление знаний на языке таблиц решений / Е.А.Евсин, Л.Х.Зубаирова.- Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 1999. – 38 с.
133. Елизаветин М.А. Повышение надежности машин / М.А.Елизаветин.- М.: Машиностроение , 1973.- 430 с.
134. Ельцов М. Ю. Проектирование в NX под управлением Teamcenter / М. Ю.Ельцов, А. А.Козлов, А. В.Седойкин. — М.: ДМК Пресс, 2013. — 752 с.
135. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г.Жарков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
136. Заблонский К. Системная квалиметрия – фундаментальная теория оптимального проектирования / К.Заблонский, С.Гутыря // Proc. International Conf. “Situation and perspective of research and development in chemical and mechanical industry” – 2001. – Volume 1. – Krusevac (Yugoslavia): IGUR “GRAFOSTIL”.– P.460–466.
137. Залога В.А. Функциональный подход к проектированию машиностроительного изделия / В.А. Залога, К.А. Дядюра // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Вип. 5.– Харків : НТУ «ХПІ». - 2010. – С. 18-31

138. Зарембо Е.Г. Материаловедение. Превращение в структуре стали и ее свойства / Е.Г.Заремб.– М.: РГОТУПС, 1995. – 48 с.
139. Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення : ДСТУ 2823-94. - К.: Держспоживстандарт України, 1994 . – 32 с.
140. Зубарь В.П. Лезвийная обработка закаленных сталей и чугунов взамен шлифования / В.П.Зубарь, А.Г.Тимчук, М.В.Чопенко // Сучасні технології в машинобудуванні. – Зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ". – Вип. 5. – 2010. – С. 32-38.
141. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания / Н.Н. Зорев.- М.: Машгиз, 1956.- 367 с.
142. Зубарев Ю.М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: учебное пособие / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев.- СПб.: Издательство «Лань», 2010.- 304 с.
143. Иванов С.Ю. Неразрушающий контроль напряженно-деформированного состояния деталей машин на базе ИВК / С.Ю.Иванов, Д.В.Васильков // Техническое диагностирование.- СПб.: АДИОС.- 1993. - С. 130-131.
144. Иванова Т.Н. Перспективные направления в совершенствовании обработки плоских поверхностей шлифованием / Т.Н. Иванова // Обработка металлов.- 2003.- № 1(18).- С. 16-18.
145. Иващенко И.А. Автоматизированное проектирование технологических процессов изготовления деталей двигателей летательных аппаратов / И.А.Иващенко, И.Г.Иванов, В.А.Мартынов. – М.: Машиностроение, 1992. – 336 с.
146. Ильин Л А. Титановые сплавы: состав, структура, свойства; / А.А.Ильин, Б. А. Колачев, И.С. Польшкин.- М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 с.
147. Ильичев А.В. Эффективность проектируемой техники: основы анализа / А.В.Ильичев. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.

148. Интегрированные генеративные технологии / А.И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А. И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 416 с.
149. Интеллектуальные системы принятия проектных решений / А.В. Алексеев, А.Н. Борисов, Э.Р. Вилюмс и др. – Рига: Зинатне, 1997. – 320 с.
150. Ишлинский А.Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю.Ишлинский, Д.Д.Ивлев.- М.: Физматлит, 2001.- 702 с.
151. Кабалдин Ю. Г. Разрушение режущей части твердосплавного инструмента под воздействием адгезионных явлений / Ю. Г.Кабалдин // Станки и инструмент.- 1981.- № 2. -С. 35-41.
152. Кайбышев О.А. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов / О.А.Кайбышев, Ф.З.Утяшев.- М.: Наука, 2002. - 438 с.
153. Капустин Н.М. Автоматизация машиностроения / Н. М. Капустин, Н. П. Дьяконова, П. М. Кузнецов; под ред. Н. М. Капустина. - М.: Высшая школа, 2007. - 223 с.
154. Каталог режущих инструментов компании Sandvik Coromant. Точение материалов высокой твердости пластинами из CBN [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/ru-ru/c-2940-137.pdf>.
155. Карпаш А.М. Аналіз відомих методів контролю фізико-механічних характеристик металу / А.М. Карпаш // Нафтогазова енергетика. Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу.- 2012.- № 1(17).- С.8-23.
156. Касимов Л.Н. Технология формирования поверхностного слоя деталей / Касимов Л.Н., Праведников И.С. - Уфа: УТИС, 1999. – 167 с.
157. Кийко И. А. Теория пластического течения / И.А.Кийко.- М.: Изд-во МГУ, 1978.- 76 с.
158. Ковтунов А. Сквозная 3D-технология АСКОН / А.Ковтунов, А.Личман // САПР и графика. - 2013. - № 3. - С. 46-49.

159. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / Когаев В.П.- М.: Машиностроение, 1993.- 364 с.
160. Колмогоров В.Л. Механика обработки материалов давлением / В.Л.Колмогоров.- Екатеринбург: Изд-во УрГТУ-УПИ, 2001.- 319 с.
161. Комбалов В. С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / В.С.Комбалов, Е.А.Марченко; под. ред. К.В. Фролова.- М.: Машиностроение, 2008. - 296 с.
162. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ / В.С. Комбалов.- М.: Наука, 1974. - 112 с.
163. Конева Н.А. Природа стадий пластической деформации / Н.А.Конева // Соросовский образовательный журнал.- 1998.- №6. – С.99-105.
164. Кооперативные процессы и локализация деформации / В.А. Лихачев и др.- Киев: Наукова думка, 1989. - 320 с.
165. Косолапов В. Б. Влияние параметров микронеровностей поверхности на процесс адсорбции / В.Б.Косолапов, Ю.В.Рукавишников // Вестник ХНАДУ.- 2005.- №29.- С.34-39.
166. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И.Костецкий. - Киев: Техника, 1976.- 296 с.
167. Котенева Н.В. Упругопластический контакт гладкой сферы с плоской поверхностью при динамическом нагружении / Н.В.Котенева // Известия Томского политехнического университета.- 2005.- Т. 308.- № 2.- С.114-116.
168. Кошовий В.В. Технології і засоби ультразвукової комп'ютерної томографії для неруйнівної оцінки об'ємної однорідності властивостей матеріалу в товстолистових конструкціях обладнання АЕС / В.В. Кошовий, О.Є. Левицький, А.Б. Лозинський, І.М. Романишин // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин – К : ІЕЗ ім.Є.О. Патона НАН України. – 2006. – С. 196-201

169. Кравченко Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке / Б.А.Кравченко.- Куйбышев: Издательство Куйбышевского политехнического института, 1981.- 90 с.
170. Кравченко Б.А. Физические аспекты теории процесса резания металлов / Б.А.Кравченко, А.Б.Кравченко. – Самара, 2002. – 167 с.
171. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В.Крагельский.- М.: Машиностроение, 1969.- 480 с.
172. Крагельский И.В. Основы расчета на трение и износ / И.В.Крагельский, М.Н.Добычин, В.С.Комбалов.- М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
173. Крауткремер Й. Ультразвуковой контроль материалов: справочное издание / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Metallurgiya, 1991. – 752 с.
174. Криворучко Д. В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы / Д.В.Криворучко, В.А.Залого. – Сумы: Университетская книга, 2012.- 435 с.
175. Криворучко Д. В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д. В. Криворучко, В.О. Залого, В.Г. Корбач. - Суми: Вид-во СумДУ, 2010. –208 с.
176. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: Автореф. дисс. докт. техн. наук: 05.03.01. - Харків, 2010.- 40 с.
177. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. Ч. 1. / Дж. Кристиан.– М.: Мир, 1978.- с. 728-751.
178. Кузнецова Е.В. Математическое планирование эксперимента / Е.В. Кузнецова.- Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. – 35 с.
179. Кукуджанов В.Н. Компьютерное моделирование деформирования, повреждаемости и разрушения неупругих материалов и конструкций / В.Н.Кукуджанов. – М.: МФТИ, 2008.- 215 с.

180. Кульга К.С. Автоматизация технической подготовки и управления производством на основе PLM-системы / К.С.Кульга.- М.: Машиностроение, 2008.- 265 с.

181. Лебедев А.А. Акустический контроль механических свойств стальных изделий поверхностными волнами Рэлея / А.А. Лебедев, А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1990. – №10. – С. 14-19.

182. Левицкий М.П. Температура при резании металлов / М.П.Левицкий // Журнал технической физики.-1952.- т.ХХII.- С.648-655.

183. Лившиц О.П. Деформированное состояние зоны резания и шероховатость обработанной поверхности / О.П.Лившиц, А.Е. Родыгина // Вестник ИрГТУ.- 2006.- С. 59-64.

184. Лившиц О.П. Компьютерное моделирование напряженно-деформируемого состояния в зоне стружкообразования при несвободном резании / О.П. Лившиц, А.Е. Родыгина // Труды VI международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2005». - СПб: Изд-во Политехнического университета, 2005. - С. 183-184.

185. Лившиц О.П. Моделирование формирования пластической составляющей высоты неровностей при лезвийной обработке методом конечных элементов /О.П. Лившиц, А.Е. Родыгина //Металлообработка, 2008. - №6. - С. 8-12.

186. Лоладзе Т. Н: Износ режущего инструмента / Т.Н.Лоладзе.- М.: Машгиз, 1958. – 356 с.

187. Майерс Г. Надежность программного обеспечения / Г.Майерс. – М.: Мир, 1980. – 360 с.

188. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д.Макаров.- М.: Машиностроение, 1976.- 278 с.

189. Машиностроение. Энциклопедия / Фролов К.В. и др. – М.: Машиностроение. Динамика и прочность машин.- Т.1-3., Кн.1/ Колесников К.С., Александров Д.А., Асташев В.К. и др. – 1994.- 534 с.

190. МакКлинтон Ф. Деформация и разрушение материалов / Ф.МакКлинтон, А.Аргон.- М.: Мир, 1970.- 501 с.
191. Махкамов К.Х. Расчет износостойкости машин / К.Х.Махкамов.- Ташкент: ТашГТУ, 2002. - 144 с.
192. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н.Малинин.- М.: Машиностроение, 1975.- 400 с.
193. Малкин А.Я. Обработка резанием высокопрочных и жаропрочных материалов/ А.Я. Малкин, С.В. Егоров. – М.: НТОмашпром, 1961. – 240с.
194. Малыгин Г.А. Механизм деформационного упрочнения и образования дислокационных структур в металлах при больших пластических деформациях / Г.А.Малыгин // Физика твердого тела.- С-Пб: изд-во ФТИ им.Иоффе, 2006, т.48.- вып 4.- С. 651-657.
195. Марецкая В.В. К вопросу автоматизации направленного формирования показателей качества деталей / В.В.Марецкая // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2008. – № 3. – С. 29 – 34.
196. Марецкая В.В. Проектирование технологических процессов изготовления деталей с учетом взаимного влияния формируемых показателей качества / В.В.Марецкая // Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении: Материалы 6-го Междунар. науч.-техн. семинара, 21–23 февраля 2006 г., г. Свалява. – Киев, 2006. – С. 101 – 103.
197. Марочник, сталей и сплавов. [2-е изд. доп. и испр.]/А. С. Зубченко; М. М. Колосков, Ю;В. Каширский и др. Под общ. ред. А. С. Зубченко.- М.: Машиностроение, 2003. - 784 с.
198. Марьин С.Л. Компьютерные технологии для проектирования и производства сложных изделий машиностроения / С.Л.Марьин // САПР и графика.- 2000.- №7.- С.36-42.
199. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А.А.Маталин.- Киев: Техника, 1971.- 122 с.
200. Маталин А.А. Технология машиностроения / А.А.Маталин.- СПб.:

Издательство «Лань», 2010. – 512 с.

201. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. / Ю.Г.Матвиенко.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 328 с.

202. Меррит М. Теория автоколебаний металлорежущих станков / М.Меррит // Конструирование и технология машиностроения. – 1965. – Т.87, №4. – С. 62-72.

203. Михайлов А.Н. Общий подход в создании функционально-ориентированных макро-, микро- и нанотехнологий для изделий машиностроения / Машиностроение и техносфера XXI века / А.Н.Михайлов // Сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2011 г.: в 4 т. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – Т. 2. – С. 209 – 217.

204. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А.Н.Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

205. Мохель А.Н. Контактное взаимодействие упругих тел при наличии двух резко различных по протяженности шероховатости их границ / А.Н.Мохель, Р.Л.Салганик, А.А.Федотов // Вычислительная механика сплошных сред .- М.: МФТИ – 2008.- Т.1, №4. – С. 61-68.

206. Муйземнек А. Ю. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. - Пенза : Информационноиздательский центр ЛГУ, 2005. - 106 с.

207. Муравьев В.В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки / В.В. Муравьев // Дефектоскопия. – 1989. – №2. – С. 66-68.

208. Мурашкин Л.С. Прикладная нелинейная механика станков / Л.С.Мурашкин, С.Л.Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.

209. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К.Мышкин, М.И.Петроковец.- М.: Физматлит, 2007. – 368 с.

210. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т.2 / А. Надаи. - М.: Мир, 1969. – 863 с.
211. Надійність техніки. Терміни та визначення : ДСТУ 2860-94.- К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 50 с.
212. Найфэ А.Х. Введение в методы возмущений / А.Х.Найфэ.- М.: Мир, 1984.- 536 с.
213. Николаев В.И. Системотехника: методы и приложения / В.И. Николаев, В.М. Брук. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
214. Новиков Н.В. Инструменты из сверхтвердых материалов / Н.В.Новиков.- М: Машиностроение, 2005.- 555 с.
215. Новиков Ф.В. Эффективность применения алмазного растачивания отверстий в деталях гидроаппаратуры / Ф.В.Новиков, И.А.Рябенков, В.С.Дерябин // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Технології в машинобудуванні №40. - Вестник НТУ "ХПИ".- 2011. - С. 65-72.
216. Новицкий Г.В. Оценка; погрешностей результатов, измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф.- Л.: Энергоатомиздат, 1985.- 248 с.
217. Норенков И.П. Разработка систем автоматизированного проектирования / И.П.Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1994. – 207 с.
218. Норенков И.П. САПР на выставке Comtek'2001 / И.П.Норенков // Информационные технологии. – 2001. - № 8.- С.3-9.
219. Норенков И.П. Основы теории и проектирования САПР / И.П.Норенков, В.Б.Маничев. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.
220. Овсеенко А.Н. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения / А.Н.Овсеенко, В.И.Серебряков, М.М.Гаек.- М.: Янус-К, 2004. – 296 с.
221. Основы теории резания материалов / Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. и др. ; под общ. ред. Н.П. Мазура и А.И. Грабченко. –Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.

222. Палей М.М. Технология производства приспособлений пресс-форм и штампов / М.М.Палей. – М.: Машиностроение, 1979. – 293 с.
223. Пачурин Г.В. Повышение коррозионной долговечности и эксплуатационной надежности изделий из деформационно-упрочненных металлических материалов / Г.В.Пачурин. – Н. Новгород: НГТУ, 2005. – 132 с.
224. Пачурин Г.В. Теоретические основы повышения коррозионной долговечности упрочненных металлов и сплавов / Г.В.Пачурин // Успехи современного естествознания.- М.: №2.- 2011.- С.95-99
225. Пенкин А. Г. Оценка степени деградации механических свойств и остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев, Л. Г. Маслов // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.sds.ru/articles/degradation/index.html
226. Петраков Ю.В. 3-D моделирование для САМ-систем / Ю.В.Петраков // Севастополь: Вісник СевНТУ.- Вип. 118/2011.- Серія: Машино-приладобудування та транспорт. - 2011.- С. 119-125
227. Петраков Ю.В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ / Ю.В.Петраков.- Київ: Січка. – 2011.- 221с.
228. Петраков Ю.В. Пути развития интегрированных САД/САМ-систем в машиностроении / Ю.В.Петраков // Сучасні технології в машинобудуванні.- Вип.3, Харків: ХНТУ «ХП», 2009.- С.160-167.
229. Петраков Ю.В. Нова концепція автоматизованого проектування програм для верстатів з ЧПУ / Ю.В.Петраков // Прогресивні технології і системи машинобудування.- Вип. 42.- Донецьк. - 2011. - С.238-245.
230. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С.Писаренко, А.П.Яковлев, В.В.Матвеев. – Киев: Наукова думка, 1988.- 736 с.
231. Погребинский А. Сравнительный анализ САД/САМ-систем А.Погребинский, А.Павлов // Машиностроение. – 2000. – № 8.- С. 24-31.
232. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н.Подураев.- М.: Высшая школа, 1974.- 587 с.

233. Полетика И.М. Об ультразвуковом контроле неоднородности механических свойств горячекатаной стали / И. Полетика, Н. Егорова, О. Куликова, Л. Зуев // Журнал технической физики. – 2001. – Т.71, Вып. 3. – С. 37-40.

234. Полетика М. Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М.Ф.Полетика.- М.: Машиностроение, 1969.- 114 с.

235. Прандтль Л. Применение теории Генки к равновесию пластических деформаций / [В кн.: Теория пластичности. Под ред. Ю. Н. Работнова].- М.: Иностранная литература, 1968.- С.51—55.

236. Проников А.С. Надежность машин / А.С.Проников.- М.: Машиностроение, 1978.- 592 с.

237. Прокофьев М.А. Технологическое обеспечение параметров наклепа поверхностного слоя деталей при шлифовании на основе определения скрытой энергии деформации: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Прокофьев Максим Алексеевич. – Рыбинск, 2006. – 199 с.

238. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н.Работнов.- М.: Наука, 1988.- 712 с.

239. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости: ГОСТ 25.504-82.- М.: Госстандарт, 1982.- 35 с.

240. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел. / В.Р.Регель, А.И.Слущкер, Э.Е.Томашевский.- М.: Наука, 1974.- 560 с.

241. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников.– М.: Машиностроение, 1990. -288 с.

242. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников.- М.: Машиностроение, 1981.- 279 с.

243. Рекомендации обеспечение износостойкости изделий. Основные положения: Р 50-95-88 // Государственный комитет СССР по стандартам/ М.: Госстандарт.- 1989.- 21 с.

244. Ришкова Л. М. «CALS- технології», як інноваційна основа Інформаційного перетворення. [Електронний ресурс] : http://www.rusnauka.com/18_NPM_2008/Pravo.htm.- Назва з титул. Екрана.

245. Родыгина А.Е. Моделирование образования шероховатости поверхности при несвободном резании / А.Е.Родыгина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- 2009. - №1. - С. 57-62.

246. Родыгина А.Е. Применение метода конечных элементов в исследовании формирования шероховатости поверхности с учетом пластического течения материала при несвободном резании / А.Е.Родыгина // Сборник трудов всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. - С.36-37.

247. Родыгина А.Е. Разработка базы данных параметров шероховатости поверхности при финишном точении / А.Е.Родыгина // Вестник ИрГТУ.- 2005.-№4.- С. 208.

248. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А.М.Розенберг, О.А.Розенберг.- К.: Наукова думка, 1990.-320 с.

249. Рыбин В.В. Большие пластические деформации при разрушении материалов / В. В. Рыбин. М.: Металлургия, 1986. - 224 с.

250. Рыжов Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В.Рыжов, В.И.Аверченков . – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.

251. Рыжов Э.В. Математические методы в технологических исследованиях. / Э.В.Рыжов, О.А. Горленко. – К.: Наукова Думка, 1990. – 184 с.

252. Саютин Г.И. Выбор шлифовальных кругов (для обработки жаропрочных сплавов и инструментальных сталей) / Г.И.Саютин.- М.: Машиностроение, 1976 .- 64 с.

253. Сафонов Б.П. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений / Б.П.Сафонов, А.В.Бегова.- Новомосковск.: Изд-во МХТУ им. Менделеева, 2004.- 65 с.

254. Свирцев В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки / В.И.Свирцев.- Пермь: Издание Пермского государственного технического университета, 2000. – 58 с.

255. Свинин В.М. Самоорганизация вторичных автоколебаний при лезвийной обработке / В.М.Свинин //СТИН.- 2006.- №1.- С. 7-13.

256. Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В.Семенова, Г.М.Флорианович, А.В.Хорошилов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 336 с.

257. Серенсен С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / С.В.Серенсен, В.П.Когаев, Р.М.Шнейдерович.- М.: Машиностроение, 1975.- 488 с.

258. Силин С.С. Применение метода подобия для определения обрабатываемости резанием современных материалов / С.С.Силин // Труды Рыбинского авиационного технолог, ин-та, № 3. — Новые методы определения обрабатываемости материалов резанием и шлифованием.- Ярославль: изд. Ярославского политехн.ин-та, 1975.- С. 5—33.

259. Силин С. С. Теоретическое определение параметров процесса резания / С.С.Силин // Производительная обработка и технологическая надежность деталей машин. Межвузовский сб. научных трудов.- 1977.- № 6.- С. 3—16.

260. Силин С. С. Оптимизация процессов резания с учетом обеспечения заданной шероховатости обработанной поверхности / С. С.Силин, В. А.Козлов // Производительная обработка и технологическая надежность деталей машин. Межвузовский сб. научных трудов.- 1977.- № 6.- С. 36—41.

261. Скотникова М.А. Фрикционные процессы при высокоскоростной лезвийной обработке материалов / М.А. Скотникова, А.В. Соколов, Е.К. Иванов // Сб. трудов «Трибология-машиностроению», ИПМаш РАН.- 2010. - С. 175-177.

262. Сорокин В.Ф. Компьютерная технология подготовки производства лопаток авиационных двигателей / В.Ф.Сорокин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». - 2003.- Вып. 17.- С. 57-63.

263. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов / В.К.Старков.- М.: Машиностроение, 2009.-640 с.

264. Степнов М.Н. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / М.Н.Степнов.- М.: МАТИ, 2003.- 119 с.

265. Степнов М.Н. Косвенная оценка пределов выносливости титановых сплавов при переменном изгибе, растяжении-сжатии и кручении / М.Н.Степнов, И.Е.Ковалев, А.В.Николаев // Заводская лаборатория».- 1999.- №3.- С. 41-44.

266. Структурно-фазовые превращения в труднообрабатываемых материалах как способ повышения износостойкости инструмента / [Е.К. Иванов, М.А. Скотникова, Н.А. Крылов и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. — 2011.- №4.- с. 41-53.

267. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / [В.Е. Панин и др.; под . ред. Панина В.Е.]. -Новосибирск: Наука, 1990.- 251 с.

268. Ступницький В.В., Новіцький Я.М. Шляхи зменшення автоколивань інструмента під час розточування глибоких отворів / В.В.Ступницький, Я.М.Новіцький // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”.- 2006.- №560.- С. 8-15.

269. Ступницький В. Принципи формування системної моделі у CALS-технології машинобудівного виробництва / В.В.Ступницький // Тези доповідей 9-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків.- 2009.- С. 199-201.

270. Ступницький В.В. Моделювання напружено-деформованого стану матеріалу в зоні різання для структурно-параметричної оптимізації

технологічної операції токарного оброблення / В.В.Ступницький // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”.- 2011.- №713.- С. 45-49.

271. Ступницький В.В. Механіка дислокацій під час різання та її моделювання методами скінчених елементів / В.В.Ступницький // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”.- 2012.- №729.- С. 25-33.

272. Ступницький В.В. Аналіз та вибір критерію локального руйнування під час імітаційного моделювання процесів різання у системі Deform 2D / В.В.Ступницький // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”.- 2012.- №729.- С. 107-115.

273. Ступницький В.В. Дослідження напружено-деформованого стану деталей машин під час їх механічного оброблення у зоні стружкоутворення / В.В.Ступницький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Динаміка, міцність та проектування машин і приладів».- Львів.- 2012.- №730.– С. 125-129.

274. Ступницький В.В. Моделювання процесу різання в автоматизованій системі інженерного аналізу DEFORM 2D / В.В.Ступницький // Український міжвідомчий науково-технічний збірник "Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні".- Львів.- 2012.- №46.– С. 141-144.

275. Ступницький В.В. Використання автоматизованого програмного комплексу DEFORM для дослідження температурних та деформаційних параметрів під час різання металів / В.В.Ступницький, Б.Р.Магерус // Український міжвідомчий науково-технічний збірник "Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні". - Львів. - 2012.- №46. – С. 145-152.

276. Ступницький В.В. Математичне моделювання автоколивань різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні /

В.В.Ступницький, Я.М.Новіцький // *Машинознавство*. - 2013. — №1-2 (187-188).- С.19-22.

277. Ступницький В.В. Імітаційне реологічне моделювання поверхневого наклепу, що формується в результаті виконання технологічного переходу лезового оброблення деталі / В.В.Ступницький // *Збірник наукових праць Луцького національного технічного університету «Перспективні технології та прилади»*. - Луцьк. - 2013, Випуск 3.– С.133-140.

278. Ступницький В.В. Обладнання та прогресивні методи формоутворення виробів / В.В.Ступницький, І.Є.Грицай, А.М.Сліпчук.- Львів: вид-во «Львівська політехніка», 2012.- 360 с.

279. Ступницький В.В. Імітаційне реологічне моделювання процесу стружкоутворення в зоні різання / В.В.Ступницький // *Збірник наукових праць «Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии»*.- Краматорськ.- 2012.- № 1 (9Е).- с. 186-193

280. Ступницький В.В. Використання САФ-системи як основи формування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва / В.В.Ступницький // *Вісник НУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні»*.- 2012.- №746.- с. 40-45.

281. Ступницький В.В. Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу / В.В.Ступницький // *Вісник Донецького національного технічного університету «Прогресивні технології і системи машинобудування»*. - 2013.- Вип.1 (45). – 2 (46).- с. 249-256.

282. Ступницький В.В. Исследование адиабатического сдвига стружки при механической обработке титановых и никелевых сплавов на основе анализа результатов имитационного реологического моделирования в системе DEFORM / В.В.Ступницький // *Научный (производственно-практический) журнал «Вестник Гродзенскага Дзяржаўнага Ўніверсітэта імя Янкі Купалы»*, Гродно.- 2013.- №3(158).- Серия 6.- С. 76-86.

283. Ступницький В.В. Триботехнічний критерій формування функціонально-орієнтованої технології виготовлення деталей в машинобудуванні / В.В.Ступницький, Є.М.Махоркін // Збірник наукових праць Луцького національного технічного університету «Наукові нотатки». – Луцьк. 2013. – Вип. №42. – С. 305-313.

284. Ступницький В.В. Концептуальные особенности проектирования объектно-ориентированных и функционально-ориентированных технологий машиностроения / В.В.Ступницький // Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века.- Том 3.- Донецьк.- 2013.- С.55-60.

285. Ступницький В.В. Визначення деформаційної складової параметру шорсткості із застосування методів реологічного імітаційного моделювання процесу різання / В.В.Ступницький // Машинознавство. — 2013. — №7-8 (193-194).- С.45-48

286. Ступницький В.В. Структура та функції системи автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва на основі концепції функціонально-орієнтованого проектування операцій / В.В.Ступницький // Міжнародний науковий журнал «Технологічні комплекси», Луцьк.- 2013.- №2(8). – С.65-71

287. Ступницький В.В. Узагальнений алгоритм структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу / В.В.Ступницький // Міжнародний збірник наукових праць «Прогресивні технології і системи машинобудування», Донецьк.- №2 (48).- 2014.- С. 109-120.

288. Ступницький В.В. Структурно-параметрична оптимізація технологічних процесів при забезпеченні експлуатаційних властивостей деталей / В.В.Ступницький // Східно-Європейський журнал передових технологій», Харків.- 2014.- №2/3(68). – С.9-16.

289. Ступницький В.В., Кук А.М. Дослідження залежності напружено-деформованого стану заготовки від переднього кута різального клина на основі

реологічного моделювання процесу різання / В.В.Ступницький, А.М.Кук // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць .- Вип.9.- Харків: НТУ «ХП».- 2014.- С. 98-110.

290. Ступницький В.В. Система автоматизованого формоутворення деталей на основі імітаційного реологічного моделювання процесу різання / В.В.Ступницький // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ.- вип. №34.- 2014. – С. 9–18.

291. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин /А.М.Сулима, В.А.Шулов, Ю.Д. Ягодкин. — М.: Машиностроение, 1988. —240 с.

292. Суворов А. А. Обработка деталей из вольфрама и его сплавов / А. А. Суворов. – М.: Машиностроение , 1978. - 134 с.

293. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г.Суслов.- М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

294. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г.Суслов.- М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

295. Суслов А.Г. Научно-технические технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный.- М.: Машиностроение, 2012.- 528 с.

296. Сычев В. В. Дифференциальные уравнения термодинамики / В.В.Сычев.- М.: Высшая школа, 1991.- 224 с.

297. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / Бродский В.З., Бродский Л.И., Голикова Т.И. - М.: Металлургия, 1982. - 752 с

298. Талантов Н. В: Физические основы процесса резания / Н.В.Талантов.- Волгоград: Волгоградская правда, 1984. - С. 3-37.

299. Технологические остаточные напряжения / [А.В. Подзей, А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев и др.].- М.: Машиностроение, 1973.- 216 с.

300. Технологическое наследование комплекса эксплуатационных параметров качества материала и поверхности детали / [Хейфец М. Л.,

Васильев А. С., Клименко С. А., Танович Л.А] // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві.- Одеса : ОНПУ.- 2014, вип. 2(7).- С.29-37

301. Технология машиностроения / [В.М.Бурцев, А.С.Васильев, А.М.Дальский и др.]. – М.: Изд.-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 564 с.

302. Травин О.В. Материаловедение / О.В.Травин .- М.: Металлургия, 1989. – 192 с.

303. Трение, износ и смазка / [Под. ред. А.В. Чичинадзе].- М.: Машиностроение, 2003.- 576 с.

304. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн./ [Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина]. - М.: Машиностроение, Кн.1.- 1978.- 400 с.

305. Третьяков И. П. Исследование прочности режущей части пластин сплавов при нормальной и повышенной температурах / И. П.Третьяков, Н. В.Яцук.- В кн.: Надежность режущего инструмента.- Киев: Техника, 1972.- С.131—135.

306. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / [Под редакцией М. А. Мейерса и Л.Е. Мура].- М.: Машиностроение, 1984.- 512 с.

307. Улиг Г.Г. Коррозия и борьба с ней / Г.Г.Улиг, Р.У.Ревн. Под ред. А. М. Сухотина. — Л.: Химия, 1989. - 456 с.

308. Федонин О.Н. Инженерия поверхности детали с позиции ее коррозионной стойкости / О.Н.Федонин // Инженерный журнал: справочник. – 2001. - №10. – С.17-19.

309. Федотов А. Измерение, анализ и компьютерное моделирование шероховатости поверхности субстрата как этап решения задачи оценки качества покрытий / А.Федотов, А.Мохель, Р.Салганик // Научные труды МАТИ им. К.Э.Циолковского.- 2007.- №12.- С.35-47.

310. Физико-технологические основы методов обработки / [Под ред. А.П. Бабичева]. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с.

311. Хеллан К. Введение в механику разрушения / К.Хеллан.- М. : Мир, 1988.- 346 с.

312. Хрущев М.М. Склерометрия: теория, методика, применение испытаний на твердость царапанием / М. М. Хрущев.- М., 1968.- 219 с.
313. Челищев Б.Е. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении / Б.Е.Челищев, И.В.Боброва, А.Гонсалес-Сабатер Под ред. акад. Н.Г.Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
314. Шарко А.В. Современное состояние и перспективы развития акустических методов контроля прочностных свойств конструкционных материалов / А.В. Шарко // Дефектоскопия. – 1983. – № 5. – С. 72-87.
315. Швец С.В. Применение феноменологической теории деформируемости при исследовании процесса стружкообразования / С.В.Швец // Вісник СумДУ.- №3 (49).- 2003. - С.144-161.
316. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: ГОСТ 2789-73.- М.: Госстандарт, 1973.- 22 с.
317. Широков В.В. Комп'ютерний обробіток профілограм фрикційних поверхонь / В.В.Широков, Л.А.Арендар, Ю.І.Ковальчик, Х.Б.Василів, О.М.Василів // Фізико-хімічна механіка матеріалів.- 2005. – № 1. – С. 93–96.
318. Шредингер Э. Статистическая термодинамика / Э.Шредингер. - Ижевск: Изд-во РХД, 1999.- 96 с.
319. Щербаков Н.П. Автоматизация технологического проектирования / Н.П.Щербаков . – Барнаул.: Изд-во АлтГТУ, 2002. – 426 с.
320. Щипачев А. М. Методы расчета усталостной долговечности и предела выносливости с учетом модифицированных поверхностных слоев : монография / А.М.Щипачев. - Уфа : УГАТУ, 2000. - 109 с.
321. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г.Шнейдер.- Л.: Машиностроение , 1982 – 247 с.
322. Экономическая информатика и вычислительная техника / Г.А.Титаренко, Н.Г.Черняк, Л.В.Еремин и др. Под ред. В.П.Косарева, Ю.А.Королева. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 336 с.
323. Электронные, ионные и плазменные технологии . Приложение № 1 // Справочник. Инженерный журнал.- 2000. - № 1.- 24 с.

324. Эпштейн Г.Н. Высокоскоростная деформация и структура металлов / Г. Н. Эпштейн, О. А. Кайбышев.- М.: Металлургия, 1971. - 198 с.

325. Ягліньський В.П. Моделювання динамічних процесів роботизованого виробництва / В.П.Ягліньський.- Одеса: Астропринт, 2004.- 232 с.

326. Ярославцев В.М. Механика процесса резания пластически деформированных металлов с неоднородными свойствами по толщине срезаемого слоя / В.М.Ярославцев // [Электронный ресурс].- Электронное научно-техническое издание МВТУ им.Баумана.- №8 .- 2011.- 19 с.

327. Ящерицын П.И. Теория резания /П.И.Ящерицын, Е.Э.Фельдштейн, М.А.Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006.- 512 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А.

Чисельні результати імітаційного моделювання динаміки критеріїв руйнування

(метод оброблення – точіння , матеріал деталі – сталь 35;

режими різання $t=0,2$ мм, $S=0,25$ мм; $V=120$ м/хв)

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000	0,000000
0,000001	0,007616	0,000001	0,000616	0,001	0,000902
0,000003	0,015741	0,000002	0,004913	0,002	0,005999
0,000004	0,024291	0,000002	0,004926	0,002	0,006021
0,000005	0,033108	0,000003	0,004926	0,003	0,006021
0,000007	0,042034	0,000005	0,004926	0,005	0,006021
0,000008	0,050833	0,000006	0,004926	0,006	0,006021
0,000009	0,059264	0,000007	0,004926	0,007	0,006021
0,000011	0,067397	0,000009	0,004926	0,009	0,006021
0,000012	0,075402	0,000010	0,024305	0,010	0,028824
0,000013	0,083252	0,000011	0,051538	0,011	0,065679
0,000015	0,090728	0,000013	0,078198	0,013	0,106616
0,000016	0,097821	0,000014	0,104107	0,014	0,150508
0,000017	0,104538	0,000015	0,129268	0,015	0,196737
0,000019	0,110883	0,000015	0,084614	0,015	0,128742
0,000020	0,116861	0,000017	0,088271	0,017	0,135547
0,000020	0,070213	0,000017	0,089684	0,017	0,138297
0,000021	0,072920	0,000017	0,089684	0,017	0,138297
0,000023	0,076040	0,000019	0,089684	0,019	0,138297
0,000024	0,089968	0,000020	0,089684	0,020	0,138297
0,000025	0,105562	0,000022	0,089684	0,022	0,138297
0,000027	0,122844	0,000023	0,089684	0,023	0,138297
0,000028	0,141884	0,000024	0,092801	0,024	0,145763
0,000030	0,162352	0,000026	0,100502	0,026	0,164188
0,000031	0,183626	0,000027	0,110261	0,027	0,187722
0,000032	0,205722	0,000028	0,121669	0,028	0,215462
0,000034	0,228595	0,000028	0,123894	0,028	0,220788
0,000035	0,251544	0,000030	0,136873	0,030	0,252131
0,000036	0,273887	0,000030	0,125242	0,030	0,221186
0,000038	0,295801	0,000031	0,126222	0,031	0,221191
0,000039	0,317289	0,000032	0,126786	0,032	0,221191
0,000040	0,338574	0,000034	0,126884	0,034	0,221191
0,000042	0,359751	0,000034	0,126884	0,035	0,221191
0,000043	0,380737	0,000035	0,126884	0,036	0,221191
0,000044	0,401379	0,000036	0,126884	0,038	0,221191

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000046	0,421366	0,000038	0,126884	0,039	0,235533
0,000047	0,440479	0,000039	0,126884	0,041	0,273164
0,000048	0,458751	0,000041	0,126884	0,042	0,314810
0,000050	0,476251	0,000042	0,126884	0,043	0,360564
0,000050	0,476251	0,000043	0,135429	0,045	0,410207
0,000051	0,480997	0,000045	0,145954	0,046	0,462832
0,000052	0,485565	0,000046	0,156435	0,047	0,516569
0,000054	0,489893	0,000047	0,166661	0,049	0,568068
0,000055	0,493876	0,000049	0,175422	0,050	0,612325
0,000056	0,497413	0,000050	0,182399	0,051	0,645135
0,000058	0,500434	0,000051	0,186946	0,053	0,665006
0,000059	0,502920	0,000053	0,188508	0,054	0,672667
0,000060	0,504957	0,000054	0,188508	0,054	0,526497
0,000062	0,506605	0,000054	0,151934	0,055	0,526497
0,000063	0,507838	0,000054	0,151934	0,057	0,526498
0,000063	0,442122	0,000055	0,151934	0,058	0,526499
0,000064	0,444090	0,000057	0,151934	0,059	0,526501
0,000066	0,445769	0,000058	0,151934	0,061	0,526506
0,000067	0,447155	0,000059	0,151934	0,062	0,526520
0,000068	0,448242	0,000061	0,151934	0,063	0,526537
0,000070	0,449110	0,000062	0,151934	0,063	0,266633
0,000071	0,457818	0,000063	0,151934	0,065	0,266633
0,000072	0,464376	0,000065	0,151934	0,066	0,284704
0,000074	0,468742	0,000066	0,151934	0,067	0,344255
0,000075	0,470841	0,000067	0,151934	0,069	0,398666
0,000075	0,470841	0,000069	0,169973	0,070	0,447709
0,000076	0,471099	0,000070	0,184815	0,071	0,490582
0,000078	0,471300	0,000071	0,199100	0,073	0,526591
0,000079	0,471460	0,000073	0,213083	0,074	0,555778
0,000080	0,471592	0,000074	0,227139	0,075	0,578646
0,000082	0,471701	0,000075	0,240952	0,077	0,596344
0,000083	0,471790	0,000077	0,254329	0,078	0,610321
0,000085	0,471859	0,000078	0,267309	0,079	0,853173
0,000086	0,471907	0,000079	0,279968	0,081	1,088925
0,000087	0,471935	0,000081	0,292316	0,082	1,355693
0,000089	0,471946	0,000081	0,292316	0,082	0,608178
0,000090	0,471946	0,000082	0,292316	0,083	0,608178
0,000091	0,471946	0,000083	0,292316	0,085	0,608178
0,000091	0,453333	0,000085	0,292316	0,086	0,608178
0,000093	0,454442	0,000086	0,292316	0,087	0,608178
0,000094	0,455391	0,000087	0,292316	0,089	0,608178
0,000095	0,456155	0,000089	0,292316	0,090	0,608178
0,000097	0,456698	0,000090	0,292316	0,091	0,608178

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000098	0,457073	0,000091	0,292316	0,093	0,608178
0,000099	0,457257	0,000093	0,292316	0,094	0,608178
0,000101	0,468928	0,000094	0,292316	0,096	0,608178
0,000102	0,482151	0,000096	0,292316	0,097	0,608178
0,000103	0,495328	0,000097	0,292316	0,098	0,608180
0,000105	0,508686	0,000098	0,292316	0,099	0,608181
0,000105	0,338360	0,000099	0,292316	0,099	0,424734
0,000106	0,343904	0,000099	0,281613	0,101	0,424734
0,000107	0,354649	0,000101	0,281613	0,102	0,426550
0,000109	0,363933	0,000102	0,281613	0,103	0,493807
0,000110	0,371806	0,000104	0,281613	0,105	0,554202
0,000111	0,378215	0,000105	0,281613	0,106	0,606586
0,000113	0,383504	0,000106	0,281613	0,107	0,653150
0,000114	0,387154	0,000108	0,281613	0,109	0,690358
0,000115	0,389435	0,000109	0,281613	0,110	0,721414
0,000117	0,391976	0,000110	0,281613	0,111	0,750511
0,000118	0,403199	0,000112	0,281613	0,111	0,496085
0,000119	0,414483	0,000113	0,281613	0,113	0,523693
0,000119	0,414483	0,000114	0,281613	0,114	0,544468
0,000121	0,422118	0,000116	0,281613	0,115	0,561292
0,000122	0,428965	0,000116	0,181799	0,117	0,574708
0,000123	0,434195	0,000117	0,184080	0,118	0,598778
0,000125	0,437804	0,000118	0,194060	0,120	0,624985
0,000126	0,439902	0,000120	0,222612	0,121	0,646788
0,000127	0,440864	0,000121	0,249341	0,122	0,663457
0,000129	0,441139	0,000122	0,273677	0,124	0,675245
0,000130	0,441180	0,000124	0,295345	0,125	0,683111
0,000131	0,441207	0,000125	0,295345	0,126	0,683111
0,000133	0,441224	0,000126	0,295345	0,128	0,683111
0,000133	0,377011	0,000128	0,295345	0,129	0,683111
0,000134	0,381433	0,000129	0,295345	0,130	0,683111
0,000135	0,384888	0,000130	0,295345	0,130	0,611736
0,000137	0,387410	0,000130	0,208206	0,132	0,611736
0,000138	0,389095	0,000132	0,210837	0,133	0,611736
0,000140	0,390070	0,000133	0,212395	0,134	0,611737
0,000141	0,390497	0,000134	0,213213	0,136	0,611741
0,000142	0,390624	0,000136	0,213486	0,137	0,611770
0,000144	0,390625	0,000137	0,213515	0,138	0,611816
0,000145	0,390625	0,000138	0,213516	0,140	0,611816
0,000146	0,390625	0,000140	0,213517	0,141	0,611816
0,000148	0,390625	0,000141	0,213522	0,142	0,611816
0,000148	0,390625	0,000142	0,213523	0,142	0,560412
0,000149	0,394457	0,000144	0,213523	0,144	0,560412

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000150	0,398257	0,000145	0,213587	0,145	0,560412
0,000152	0,401212	0,000145	0,162660	0,146	0,560412
0,000153	0,403280	0,000146	0,179299	0,148	0,560412
0,000154	0,404516	0,000148	0,198243	0,149	0,560412
0,000156	0,405261	0,000149	0,215955	0,150	0,560412
0,000157	0,405737	0,000150	0,232388	0,152	0,560412
0,000158	0,406150	0,000152	0,247331	0,153	0,560412
0,000160	0,406553	0,000153	0,260703	0,154	0,560412
0,000161	0,406958	0,000154	0,272400	0,156	0,560412
0,000162	0,413096	0,000156	0,282301	0,157	0,560412
0,000162	0,402396	0,000157	0,290295	0,158	0,560412
0,000164	0,403478	0,000159	0,296313	0,160	0,560412
0,000165	0,404228	0,000160	0,300479	0,161	0,560412
0,000166	0,404645	0,000161	0,311110	0,162	0,560412
0,000168	0,404791	0,000163	0,351273	0,164	0,560412
0,000169	0,404808	0,000164	0,391657	0,165	0,560412
0,000170	0,404808	0,000165	0,432374	0,165	0,497375
0,000172	0,404808	0,000167	0,473405	0,166	0,497378
0,000173	0,404808	0,000168	0,514511	0,168	0,497378
0,000174	0,404808	0,000169	0,555604	0,169	0,497378
0,000176	0,404808	0,000171	0,596357	0,170	0,497378
0,000176	0,380837	0,000172	0,636745	0,172	0,497378
0,000177	0,380929	0,000172	0,373485	0,173	0,497378
0,000178	0,380968	0,000173	0,397644	0,175	0,497378
0,000180	0,386565	0,000175	0,420009	0,176	0,497378
0,000181	0,393874	0,000176	0,440499	0,177	0,497378
0,000182	0,399701	0,000177	0,459009	0,179	0,497378
0,000184	0,404143	0,000179	0,475434	0,180	0,497378
0,000185	0,407295	0,000180	0,489662	0,181	0,497378
0,000186	0,409222	0,000181	0,501527	0,183	0,497378
0,000186	0,331395	0,000183	0,510925	0,184	0,497378
0,000188	0,347717	0,000184	0,517952	0,185	0,497378
0,000189	0,365444	0,000185	0,522933	0,187	0,497378
0,000190	0,384105	0,000187	0,526558	0,187	0,465324
0,000192	0,403556	0,000188	0,528959	0,188	0,465324
0,000193	0,423657	0,000189	0,528959	0,189	0,465324
0,000195	0,443946	0,000191	0,528959	0,191	0,465324
0,000196	0,463854	0,000192	0,528959	0,192	0,465324
0,000197	0,483419	0,000193	0,528959	0,193	0,465324
0,000199	0,502710	0,000195	0,528959	0,193	0,409409
0,000200	0,521247	0,000196	0,528959	0,195	0,457949
0,000200	0,359251	0,000197	0,528959	0,196	0,509179
0,000201	0,365903	0,000199	0,528959	0,197	0,557513

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000203	0,372425	0,000200	0,528959	0,199	0,602312
0,000204	0,379141	0,000200	0,398447	0,200	0,642599
0,000205	0,386159	0,000201	0,398449	0,201	0,677093
0,000207	0,393523	0,000203	0,398449	0,203	0,704601
0,000208	0,401288	0,000204	0,398449	0,204	0,725599
0,000209	0,409516	0,000205	0,398449	0,205	0,739913
0,000211	0,418239	0,000207	0,398449	0,207	0,747959
0,000212	0,427463	0,000208	0,398449	0,208	0,748309
0,000213	0,437056	0,000209	0,398449	0,209	0,748309
0,000215	0,448242	0,000211	0,398449	0,211	0,748309
0,000215	0,325334	0,000212	0,398449	0,212	0,780298
0,000216	0,325334	0,000214	0,398449	0,212	0,492380
0,000217	0,325334	0,000215	0,398449	0,212	0,492380
0,000219	0,330421	0,000216	0,398449	0,213	0,492380
0,000220	0,341848	0,000218	0,398449	0,215	0,492380
0,000221	0,354015	0,000219	0,398449	0,216	0,492380
0,000223	0,367569	0,000220	0,398449	0,217	0,505398
0,000224	0,381390	0,000220	0,327854	0,219	0,519339
0,000225	0,396266	0,000222	0,327854	0,220	0,533565
0,000227	0,413178	0,000223	0,327854	0,221	0,548123
0,000228	0,432597	0,000224	0,327854	0,223	0,562793
0,000229	0,452046	0,000226	0,327854	0,224	0,576873
0,000229	0,318331	0,000227	0,327854	0,225	0,590321
0,000231	0,318331	0,000228	0,327854	0,227	0,602685
0,000232	0,318331	0,000230	0,327854	0,227	0,564160
0,000233	0,318331	0,000231	0,327854	0,228	0,590967
0,000235	0,318331	0,000232	0,327854	0,230	0,613498
0,000236	0,318331	0,000234	0,327854	0,231	0,630728
0,000237	0,320723	0,000235	0,327854	0,232	0,644917
0,000239	0,338879	0,000236	0,327854	0,234	0,656249
0,000240	0,355727	0,000238	0,327854	0,235	0,664960
0,000241	0,370600	0,000239	0,327854	0,236	0,671213
0,000243	0,384046	0,000240	0,327854	0,238	0,675225
0,000243	0,318331	0,000242	0,327854	0,239	0,677291
0,000244	0,318331	0,000243	0,327854	0,240	0,677705
0,000245	0,320242	0,000244	0,327854	0,242	0,677705
0,000247	0,327132	0,000246	0,327854	0,243	0,677705
0,000248	0,332952	0,000247	0,327854	0,244	0,677705
0,000250	0,338196	0,000248	0,327854	0,246	0,677705
0,000251	0,343149	0,000248	0,323382	0,246	0,608939
0,000252	0,347933	0,000250	0,323382	0,247	0,609091
0,000254	0,352492	0,000251	0,323382	0,248	0,609138
0,000255	0,356515	0,000252	0,323382	0,250	0,609138

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000256	0,359252	0,000254	0,323382	0,251	0,609138
0,000258	0,363707	0,000255	0,323382	0,252	0,609138
0,000258	0,318331	0,000256	0,323382	0,254	0,609138
0,000259	0,318331	0,000258	0,323382	0,255	0,609138
0,000260	0,318331	0,000259	0,323382	0,256	0,609138
0,000262	0,318331	0,000260	0,323382	0,258	0,609138
0,000263	0,318331	0,000262	0,323382	0,259	0,609138
0,000264	0,324754	0,000263	0,323382	0,259	0,507691
0,000266	0,337562	0,000263	0,283335	0,260	0,507691
0,000267	0,351032	0,000264	0,283335	0,262	0,507691
0,000268	0,365233	0,000266	0,283335	0,263	0,507691
0,000270	0,379059	0,000267	0,283335	0,264	0,507691
0,000271	0,392421	0,000267	0,245307	0,266	0,507691
0,000272	0,405195	0,000269	0,245307	0,267	0,507691
0,000272	0,302897	0,000270	0,245307	0,268	0,507691
0,000274	0,313448	0,000271	0,245307	0,270	0,508213
0,000275	0,324530	0,000273	0,260524	0,271	0,512568
0,000276	0,336249	0,000274	0,277190	0,272	0,514433
0,000278	0,348690	0,000275	0,292065	0,274	0,514440
0,000279	0,361876	0,000277	0,292065	0,274	0,514440
0,000280	0,375817	0,000278	0,292065	0,275	0,524232
0,000282	0,390517	0,000279	0,292065	0,276	0,532298
0,000283	0,405980	0,000281	0,292065	0,278	0,538170
0,000284	0,422212	0,000282	0,292065	0,279	0,541889
0,000286	0,439993	0,000282	0,234616	0,280	0,543722
0,000287	0,461530	0,000283	0,234616	0,282	0,544237
0,000287	0,300086	0,000285	0,235400	0,283	0,544271
0,000288	0,301936	0,000286	0,246952	0,285	0,544276
0,000290	0,304482	0,000287	0,257603	0,286	0,544286
0,000291	0,307692	0,000289	0,267431	0,287	0,544341
0,000292	0,313385	0,000290	0,276449	0,289	0,544341
0,000294	0,324728	0,000291	0,284304	0,289	0,480270
0,000295	0,336780	0,000293	0,290511	0,290	0,480309
0,000296	0,349585	0,000294	0,294658	0,291	0,480331
0,000298	0,363051	0,000295	0,296430	0,293	0,480351
0,000299	0,377090	0,000297	0,296430	0,294	0,480351
0,000300	0,391244	0,000297	0,219560	0,295	0,480351
0,000302	0,405046	0,000298	0,219562	0,297	0,480351
0,000302	0,318867	0,000299	0,219562	0,298	0,480351
0,000303	0,320177	0,000301	0,219563	0,299	0,480351
0,000305	0,320784	0,000302	0,219563	0,301	0,480351
0,000306	0,320784	0,000303	0,219563	0,302	0,480351
0,000307	0,324252	0,000305	0,219563	0,303	0,480351

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000309	0,341732	0,000306	0,219563	0,303	0,445285
0,000310	0,360542	0,000307	0,219563	0,305	0,445285
0,000311	0,380727	0,000309	0,219563	0,306	0,445285
0,000313	0,401581	0,000310	0,219563	0,307	0,445285
0,000314	0,422839	0,000311	0,219563	0,309	0,445286
0,000315	0,444287	0,000311	0,217387	0,310	0,445295
0,000317	0,464490	0,000313	0,217387	0,311	0,445817
0,000317	0,332889	0,000314	0,217387	0,313	0,448729
0,000318	0,346182	0,000315	0,217387	0,314	0,452446
0,000319	0,359601	0,000317	0,217387	0,315	0,456379
0,000321	0,373953	0,000318	0,217387	0,317	0,460066
0,000322	0,389385	0,000319	0,217387	0,317	0,422131
0,000323	0,405886	0,000321	0,217387	0,318	0,422148
0,000325	0,423233	0,000322	0,217387	0,319	0,422156
0,000326	0,440219	0,000324	0,217387	0,321	0,422162
0,000327	0,456127	0,000325	0,217387	0,322	0,422162
0,000329	0,470816	0,000326	0,217387	0,323	0,422162
0,000330	0,484363	0,000326	0,198093	0,325	0,422162
0,000331	0,496818	0,000328	0,198093	0,326	0,422162
0,000331	0,291840	0,000329	0,198093	0,327	0,422162
0,000333	0,291840	0,000330	0,198093	0,329	0,422162
0,000334	0,299702	0,000332	0,198093	0,330	0,422162
0,000335	0,314074	0,000333	0,198093	0,331	0,422162
0,000337	0,328909	0,000334	0,198093	0,331	0,316049
0,000338	0,344220	0,000336	0,198093	0,333	0,320938
0,000339	0,360073	0,000337	0,198093	0,334	0,332728
0,000341	0,376554	0,000338	0,198093	0,335	0,342263
0,000342	0,392965	0,000340	0,198093	0,337	0,349667
0,000343	0,409240	0,000341	0,198093	0,338	0,355188
0,000345	0,424316	0,000341	0,198093	0,340	0,359152
0,000346	0,438660	0,000342	0,198093	0,341	0,361832
0,000346	0,382643	0,000344	0,198093	0,342	0,363468
0,000347	0,382643	0,000345	0,198093	0,344	0,364230
0,000349	0,382643	0,000346	0,198093	0,345	0,364368
0,000350	0,382643	0,000348	0,198093	0,345	0,364368
0,000351	0,382643	0,000349	0,198093	0,346	0,365397
0,000353	0,382643	0,000350	0,198093	0,348	0,366159
0,000354	0,382643	0,000352	0,198093	0,349	0,366698
0,000355	0,382643	0,000353	0,198093	0,350	0,367035
0,000357	0,382643	0,000354	0,198093	0,352	0,367128
0,000357	0,363553	0,000356	0,198093	0,353	0,367128
0,000358	0,363575	0,000356	0,189652	0,354	0,367128
0,000360	0,363575	0,000357	0,189652	0,356	0,367128

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000361	0,363575	0,000358	0,189652	0,357	0,367128
0,000362	0,363575	0,000360	0,189652	0,358	0,367128
0,000364	0,363575	0,000361	0,189652	0,358	0,340962
0,000365	0,363575	0,000362	0,189652	0,360	0,340962
0,000366	0,363575	0,000364	0,189652	0,361	0,340962
0,000368	0,370311	0,000365	0,191039	0,362	0,340962
0,000369	0,388267	0,000366	0,204594	0,364	0,340962
0,000370	0,405236	0,000368	0,214046	0,365	0,340962
0,000370	0,377876	0,000368	0,192828	0,366	0,340962
0,000372	0,384915	0,000369	0,192828	0,368	0,340962
0,000373	0,392544	0,000370	0,192828	0,369	0,340962
0,000374	0,400865	0,000372	0,192828	0,370	0,340962
0,000376	0,409902	0,000373	0,192828	0,372	0,340962
0,000377	0,420203	0,000374	0,192828	0,373	0,340962
0,000378	0,430388	0,000376	0,192828	0,373	0,321724
0,000380	0,441110	0,000377	0,192828	0,374	0,321724
0,000381	0,452645	0,000379	0,192828	0,376	0,321724
0,000382	0,465187	0,000380	0,192828	0,377	0,321724
0,000384	0,478904	0,000381	0,192828	0,378	0,321724
0,000385	0,493905	0,000381	0,192828	0,380	0,321724
0,000385	0,420606	0,000383	0,216294	0,381	0,321724
0,000386	0,422545	0,000384	0,238968	0,382	0,321724
0,000388	0,424382	0,000385	0,259913	0,384	0,321724
0,000389	0,426100	0,000387	0,278710	0,385	0,321724
0,000390	0,427937	0,000387	0,172584	0,386	0,321724
0,000392	0,430097	0,000388	0,172584	0,388	0,321724
0,000393	0,432707	0,000389	0,172584	0,388	0,293213
0,000394	0,435942	0,000391	0,172584	0,389	0,293213
0,000396	0,439942	0,000392	0,172584	0,390	0,293213
0,000397	0,444766	0,000393	0,172584	0,392	0,293213
0,000398	0,450436	0,000395	0,172584	0,393	0,293213
0,000398	0,342076	0,000396	0,172584	0,395	0,293213
0,000400	0,355550	0,000397	0,172584	0,396	0,293213
0,000401	0,370291	0,000399	0,175891	0,397	0,293213
0,000402	0,386124	0,000400	0,181664	0,399	0,293213
0,000404	0,403137	0,000401	0,183873	0,400	0,293213
0,000405	0,421500	0,000401	0,172584	0,401	0,293213
0,000406	0,441187	0,000403	0,175825	0,403	0,293213
0,000408	0,463131	0,000404	0,178290	0,403	0,293213
0,000409	0,485786	0,000405	0,179702	0,404	0,293213
0,000410	0,509440	0,000407	0,180122	0,405	0,293213
0,000410	0,334344	0,000408	0,180128	0,407	0,293213
0,000412	0,334344	0,000409	0,180128	0,408	0,293213

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000413	0,334344	0,000411	0,180129	0,409	0,293213
0,000415	0,347436	0,000412	0,180164	0,411	0,293213
0,000416	0,361239	0,000413	0,180383	0,412	0,293213
0,000417	0,375409	0,000415	0,180384	0,413	0,293213
0,000419	0,389789	0,000415	0,162453	0,415	0,293213
0,000420	0,404472	0,000416	0,162453	0,416	0,293213
0,000421	0,419595	0,000417	0,162453	0,417	0,293213
0,000423	0,434281	0,000419	0,162453	0,417	0,288624
0,000424	0,448215	0,000420	0,162453	0,419	0,288624
0,000425	0,461336	0,000421	0,162453	0,420	0,288624
0,000425	0,318219	0,000423	0,162453	0,421	0,288624
0,000427	0,318811	0,000424	0,162453	0,423	0,288624
0,000428	0,319443	0,000425	0,162453	0,423	0,275664
0,000429	0,320113	0,000427	0,162453	0,424	0,275664
0,000431	0,320816	0,000428	0,162453	0,425	0,275664
0,000432	0,321545	0,000429	0,162453	0,427	0,275664
0,000433	0,322298	0,000429	0,151828	0,428	0,275664
0,000435	0,323074	0,000431	0,151828	0,429	0,275664
0,000436	0,323883	0,000432	0,151828	0,431	0,275664
0,000437	0,324993	0,000434	0,151828	0,432	0,275664
0,000439	0,342269	0,000435	0,151828	0,433	0,275664
0,000440	0,359759	0,000436	0,151828	0,435	0,275664
0,000441	0,375018	0,000438	0,151828	0,436	0,275664
0,000441	0,323358	0,000439	0,151828	0,436	0,258908
0,000443	0,323772	0,000440	0,151828	0,437	0,258908
0,000444	0,324276	0,000442	0,151828	0,439	0,258908
0,000445	0,324824	0,000443	0,151828	0,440	0,258908
0,000447	0,325402	0,000444	0,151828	0,441	0,258908
0,000448	0,326009	0,000444	0,138821	0,443	0,258908
0,000449	0,326657	0,000446	0,138821	0,444	0,258908
0,000451	0,327358	0,000447	0,138821	0,445	0,258908
0,000452	0,328137	0,000448	0,138821	0,445	0,258908
0,000453	0,329051	0,000450	0,138821	0,447	0,258908
0,000455	0,342982	0,000451	0,138821	0,448	0,258908
0,000456	0,360779	0,000452	0,138821	0,450	0,258908
0,000457	0,377891	0,000454	0,138821	0,451	0,258908
0,000457	0,326028	0,000455	0,138821	0,452	0,258908
0,000459	0,327146	0,000456	0,138821	0,454	0,258908
0,000460	0,329077	0,000458	0,138821	0,455	0,258908
0,000461	0,330620	0,000459	0,138821	0,456	0,258908
0,000463	0,331720	0,000459	0,138821	0,458	0,258908
0,000464	0,332339	0,000460	0,138821	0,459	0,258908
0,000465	0,332415	0,000462	0,138821	0,460	0,258908

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000467	0,349845	0,000463	0,138821	0,462	0,258908
0,000468	0,367552	0,000464	0,138821	0,462	0,257318
0,000470	0,384701	0,000466	0,138821	0,463	0,257318
0,000471	0,401193	0,000467	0,138821	0,464	0,257318
0,000472	0,415422	0,000468	0,139038	0,466	0,257318
0,000474	0,428224	0,000470	0,139038	0,467	0,257318
0,000475	0,441897	0,000471	0,139038	0,468	0,257318
0,000475	0,405675	0,000472	0,139038	0,470	0,271452
0,000476	0,409342	0,000474	0,139038	0,471	0,315675
0,000478	0,412029	0,000474	0,126684	0,472	0,315675
0,000479	0,414027	0,000475	0,126684	0,474	0,315675
0,000480	0,415429	0,000476	0,130949	0,475	0,315675
0,000482	0,416224	0,000477	0,149154	0,476	0,315675
0,000483	0,416525	0,000479	0,165094	0,478	0,315675
0,000484	0,416525	0,000480	0,178543	0,478	0,257318
0,000486	0,416525	0,000481	0,189853	0,479	0,257318
0,000487	0,416525	0,000483	0,199388	0,480	0,257318
0,000488	0,416525	0,000484	0,199388	0,482	0,257318
0,000490	0,416525	0,000485	0,199388	0,483	0,257318
0,000491	0,431931	0,000487	0,199388	0,484	0,257318
0,000491	0,329893	0,000488	0,199388	0,486	0,257318
0,000492	0,333936	0,000488	0,125187	0,487	0,257318
0,000494	0,338031	0,000489	0,125197	0,487	0,237398
0,000495	0,342093	0,000491	0,125200	0,488	0,237398
0,000496	0,346362	0,000492	0,125203	0,490	0,237398
0,000498	0,351056	0,000493	0,125216	0,491	0,237398
0,000499	0,356362	0,000495	0,125303	0,492	0,237398
0,000500	0,362388	0,000496	0,125762	0,494	0,237398
0,000502	0,369135	0,000498	0,126527	0,495	0,237398
0,000503	0,376507	0,000499	0,127315	0,496	0,237398
0,000504	0,384323	0,000500	0,128004	0,498	0,237398
0,000506	0,392023	0,000502	0,128239	0,499	0,237398
0,000506	0,385776	0,000503	0,128249	0,500	0,237398
0,000507	0,392741	0,000503	0,113729	0,502	0,237398
0,000508	0,400454	0,000504	0,113729	0,503	0,237398
0,000510	0,409124	0,000505	0,113729	0,503	0,215847
0,000511	0,418549	0,000507	0,113729	0,505	0,215847
0,000512	0,428563	0,000508	0,113729	0,506	0,215847
0,000514	0,439074	0,000510	0,113729	0,507	0,215847
0,000515	0,449933	0,000511	0,113729	0,509	0,215847
0,000516	0,461076	0,000512	0,113729	0,510	0,215847
0,000518	0,472610	0,000514	0,113729	0,511	0,215847
0,000519	0,484746	0,000515	0,113729	0,513	0,215847

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000520	0,497554	0,000516	0,113729	0,514	0,215847
0,000520	0,458206	0,000518	0,113729	0,515	0,215847
0,000522	0,476448	0,000519	0,113729	0,517	0,215847
0,000523	0,489880	0,000519	0,109077	0,518	0,215847
0,000525	0,502473	0,000520	0,109077	0,518	0,215847
0,000526	0,515246	0,000522	0,109077	0,519	0,215847
0,000527	0,527498	0,000523	0,109077	0,521	0,215847
0,000529	0,540375	0,000524	0,109077	0,522	0,223530
0,000530	0,554098	0,000526	0,109077	0,523	0,245345
0,000531	0,569113	0,000527	0,109077	0,525	0,261463
0,000533	0,585211	0,000528	0,109077	0,526	0,261463
0,000534	0,601662	0,000530	0,109077	0,527	0,261463
0,000535	0,617972	0,000531	0,109077	0,529	0,261463
0,000537	0,637557	0,000532	0,109077	0,530	0,261463
0,000537	0,400608	0,000534	0,109077	0,531	0,261463
0,000538	0,402127	0,000534	0,109077	0,531	0,261463
0,000539	0,409778	0,000535	0,109077	0,533	0,301729
0,000541	0,421427	0,000536	0,109077	0,534	0,333443
0,000542	0,432912	0,000538	0,109077	0,535	0,360079
0,000543	0,444406	0,000538	0,103953	0,537	0,382128
0,000545	0,455994	0,000539	0,112755	0,538	0,399702
0,000546	0,467810	0,000540	0,135800	0,539	0,412989
0,000547	0,479920	0,000542	0,157004	0,541	0,422226
0,000549	0,492274	0,000543	0,176057	0,541	0,370670
0,000550	0,503954	0,000544	0,176057	0,542	0,378698
0,000551	0,514752	0,000546	0,176057	0,543	0,383368
0,000553	0,524878	0,000547	0,176057	0,545	0,384919
0,000553	0,379319	0,000547	0,173878	0,546	0,384959
0,000554	0,387845	0,000548	0,173995	0,547	0,384959
0,000555	0,394859	0,000550	0,173995	0,549	0,384959
0,000557	0,400229	0,000551	0,173995	0,550	0,384959
0,000558	0,403984	0,000552	0,173996	0,551	0,384960
0,000559	0,406383	0,000554	0,174004	0,553	0,386528
0,000561	0,416444	0,000555	0,174222	0,554	0,387523
0,000562	0,430319	0,000556	0,176346	0,554	0,380574
0,000563	0,443788	0,000558	0,179352	0,555	0,380849
0,000565	0,457005	0,000559	0,182992	0,557	0,381053
0,000566	0,470570	0,000560	0,186876	0,558	0,381154
0,000567	0,488499	0,000562	0,190391	0,560	0,381182
0,000567	0,340618	0,000563	0,192735	0,561	0,381182
0,000569	0,340878	0,000565	0,193410	0,562	0,381182
0,000570	0,344351	0,000565	0,152729	0,564	0,381182
0,000571	0,348163	0,000566	0,153552	0,565	0,381182

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000573	0,351837	0,000567	0,153736	0,566	0,381182
0,000574	0,355246	0,000569	0,153743	0,568	0,381182
0,000575	0,358565	0,000570	0,153743	0,568	0,325712
0,000577	0,361688	0,000571	0,153743	0,569	0,325712
0,000578	0,364728	0,000573	0,153743	0,570	0,325712
0,000580	0,367126	0,000574	0,153746	0,572	0,325712
0,000581	0,368625	0,000575	0,153782	0,573	0,325712
0,000582	0,369106	0,000577	0,153990	0,574	0,325712
0,000582	0,342483	0,000578	0,153990	0,576	0,325712
0,000584	0,342483	0,000578	0,090843	0,576	0,325712
0,000585	0,342673	0,000579	0,090843	0,577	0,325712
0,000586	0,348196	0,000581	0,090843	0,578	0,325712
0,000588	0,353427	0,000582	0,090843	0,580	0,325712
0,000589	0,358948	0,000583	0,090843	0,581	0,325712
0,000590	0,364954	0,000585	0,090843	0,582	0,325712
0,000592	0,378651	0,000586	0,090843	0,584	0,325712
0,000593	0,393723	0,000587	0,090843	0,585	0,338682
0,000594	0,409307	0,000589	0,090843	0,586	0,353413
0,000596	0,425465	0,000590	0,090843	0,588	0,353413
0,000597	0,442026	0,000591	0,090843	0,589	0,353413
0,000597	0,407432	0,000593	0,090843	0,590	0,353413
0,000598	0,425304	0,000594	0,090843	0,592	0,354958
0,000600	0,441473	0,000595	0,090843	0,593	0,395492
0,000601	0,455937	0,000597	0,090843	0,594	0,507569
0,000602	0,469945	0,000598	0,090843	0,594	0,264911
0,000604	0,483909	0,000598	0,087137	0,596	0,264911
0,000605	0,498068	0,000599	0,087137	0,597	0,264911
0,000606	0,512514	0,000601	0,087137	0,598	0,264911
0,000608	0,527577	0,000602	0,087137	0,600	0,283321
0,000609	0,542892	0,000603	0,087137	0,601	0,283321
0,000610	0,558816	0,000605	0,087137	0,602	0,283321
0,000612	0,579238	0,000606	0,087137	0,604	0,283321
0,000612	0,498318	0,000607	0,087137	0,605	0,283321
0,000613	0,510422	0,000609	0,087137	0,606	0,283321
0,000614	0,520008	0,000610	0,087137	0,608	0,283321
0,000616	0,529011	0,000611	0,087137	0,609	0,283321
0,000617	0,537847	0,000613	0,087137	0,609	0,278028
0,000618	0,546614	0,000613	0,086357	0,610	0,278072
0,000620	0,555509	0,000614	0,086357	0,612	0,278079
0,000621	0,564587	0,000615	0,086357	0,613	0,278084
0,000622	0,573956	0,000617	0,086357	0,615	0,278101
0,000624	0,582784	0,000618	0,086357	0,616	0,278294
0,000625	0,591018	0,000620	0,086357	0,617	0,280346

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000626	0,597886	0,000621	0,086357	0,619	0,285101
0,000626	0,424190	0,000622	0,086357	0,620	0,290442
0,000628	0,433188	0,000624	0,086357	0,621	0,295548
0,000629	0,441416	0,000624	0,086357	0,623	0,299822
0,000630	0,448391	0,000625	0,086357	0,624	0,302515
0,000632	0,454059	0,000626	0,086357	0,624	0,221969
0,000633	0,458489	0,000628	0,086357	0,625	0,221969
0,000635	0,461787	0,000629	0,086357	0,627	0,221969
0,000636	0,464124	0,000630	0,086357	0,628	0,221969
0,000637	0,465639	0,000632	0,086357	0,629	0,221969
0,000639	0,466457	0,000633	0,092256	0,631	0,221969
0,000640	0,466721	0,000634	0,104865	0,632	0,221969
0,000641	0,466721	0,000636	0,116531	0,633	0,221969
0,000641	0,344846	0,000637	0,126853	0,635	0,221969
0,000643	0,352344	0,000638	0,135381	0,636	0,221969
0,000644	0,359392	0,000640	0,141790	0,637	0,221969
0,000645	0,365955	0,000641	0,144438	0,637	0,221969
0,000647	0,371997	0,000642	0,144469	0,639	0,221969
0,000648	0,377484	0,000644	0,144477	0,640	0,221969
0,000649	0,386946	0,000645	0,161190	0,641	0,221969
0,000651	0,402370	0,000646	0,198605	0,643	0,221969
0,000652	0,417944	0,000648	0,235199	0,644	0,221969
0,000653	0,433357	0,000649	0,271057	0,645	0,221969
0,000655	0,448487	0,000649	0,081107	0,647	0,221969
0,000656	0,462242	0,000650	0,081107	0,648	0,221969
0,000657	0,475334	0,000652	0,081107	0,649	0,221969
0,000657	0,337320	0,000653	0,090670	0,651	0,221969
0,000659	0,338316	0,000654	0,090670	0,652	0,221969
0,000660	0,338937	0,000656	0,090670	0,653	0,221969
0,000661	0,339290	0,000657	0,090670	0,655	0,221969
0,000663	0,339337	0,000658	0,090670	0,655	0,196790
0,000664	0,339337	0,000660	0,090670	0,656	0,196790
0,000665	0,339337	0,000661	0,090670	0,657	0,196790
0,000667	0,339337	0,000662	0,090670	0,659	0,196790
0,000668	0,339337	0,000664	0,090670	0,660	0,196790
0,000669	0,339337	0,000664	0,090670	0,661	0,196790
0,000671	0,339337	0,000665	0,090830	0,663	0,196790
0,000672	0,339337	0,000666	0,090896	0,664	0,229248
0,000673	0,339337	0,000668	0,090994	0,665	0,260132
0,000673	0,339197	0,000669	0,091313	0,667	0,260132
0,000675	0,339197	0,000670	0,092600	0,668	0,260132
0,000676	0,349597	0,000672	0,094625	0,668	0,196790
0,000677	0,362434	0,000673	0,096857	0,670	0,196790

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000679	0,375298	0,000675	0,098966	0,671	0,196790
0,000680	0,388294	0,000676	0,100723	0,672	0,196790
0,000681	0,401507	0,000677	0,101912	0,674	0,196790
0,000683	0,415129	0,000679	0,102243	0,675	0,196790
0,000684	0,428338	0,000679	0,091501	0,676	0,196790
0,000685	0,440574	0,000680	0,095154	0,678	0,196790
0,000687	0,452155	0,000681	0,098333	0,679	0,199723
0,000688	0,463265	0,000683	0,112117	0,680	0,205931
0,000688	0,362345	0,000684	0,124898	0,682	0,209109
0,000690	0,368559	0,000685	0,135604	0,683	0,209109
0,000691	0,374013	0,000687	0,144293	0,683	0,187039
0,000692	0,379551	0,000688	0,144293	0,684	0,187039
0,000694	0,385405	0,000689	0,144293	0,686	0,187039
0,000695	0,391795	0,000691	0,144293	0,687	0,206555
0,000696	0,398877	0,000692	0,144293	0,688	0,232748
0,000698	0,407583	0,000692	0,104067	0,690	0,232748
0,000699	0,417074	0,000693	0,104067	0,691	0,232748
0,000700	0,427221	0,000695	0,104067	0,692	0,232748
0,000702	0,437781	0,000696	0,104067	0,694	0,232748
0,000703	0,451086	0,000697	0,104067	0,695	0,232748
0,000703	0,402837	0,000699	0,104067	0,696	0,232748
0,000704	0,406500	0,000700	0,104067	0,698	0,232748
0,000706	0,410734	0,000701	0,104067	0,698	0,168677
0,000707	0,416134	0,000703	0,104067	0,699	0,168677
0,000708	0,423032	0,000704	0,104067	0,700	0,168677
0,000710	0,431556	0,000705	0,133367	0,702	0,168677
0,000711	0,441519	0,000707	0,161818	0,703	0,168677
0,000712	0,452629	0,000707	0,109276	0,704	0,168677
0,000714	0,463981	0,000708	0,109276	0,706	0,168677
0,000715	0,475954	0,000709	0,110634	0,707	0,168677
0,000715	0,405500	0,000711	0,111130	0,708	0,168677
0,000716	0,405772	0,000712	0,111735	0,710	0,168677
0,000716	0,405785	0,000713	0,113296	0,710	0,168677
0,000718	0,408072	0,000715	0,117582	0,711	0,168677
0,000719	0,410598	0,000715	0,094128	0,712	0,168677
0,000720	0,413387	0,000716	0,096859	0,712	0,163281
0,000722	0,416625	0,000717	0,098551	0,714	0,163281
0,000723	0,420135	0,000719	0,104677	0,715	0,163281
0,000724	0,424083	0,000720	0,116159	0,716	0,163281
0,000726	0,428786	0,000721	0,116159	0,718	0,163281
0,000727	0,434289	0,000723	0,116159	0,719	0,163281
0,000728	0,440545	0,000724	0,116159	0,720	0,163281
0,000730	0,446336	0,000725	0,116159	0,722	0,163281

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000731	0,450843	0,000727	0,116159	0,723	0,163281
0,000731	0,376063	0,000728	0,116159	0,725	0,163281
0,000732	0,389924	0,000728	0,116159	0,726	0,163281
0,000734	0,400728	0,000730	0,116159	0,726	0,163281
0,000735	0,410337	0,000731	0,116159	0,727	0,163281
0,000736	0,419802	0,000732	0,116159	0,729	0,163281
0,000738	0,429215	0,000734	0,116159	0,730	0,163281
0,000739	0,438748	0,000735	0,116160	0,731	0,163281
0,000741	0,448648	0,000736	0,116178	0,731	0,145040
0,000742	0,458806	0,000738	0,116527	0,733	0,145040
0,000743	0,469184	0,000739	0,131428	0,734	0,145040
0,000745	0,480060	0,000740	0,145471	0,735	0,145040
0,000746	0,490231	0,000742	0,156886	0,737	0,145040
0,000747	0,498793	0,000743	0,165901	0,738	0,145040
0,000747	0,376683	0,000744	0,193553	0,739	0,145040
0,000749	0,377641	0,000746	0,193553	0,741	0,145040
0,000750	0,378016	0,000746	0,133933	0,742	0,145040
0,000751	0,378116	0,000747	0,133933	0,743	0,145040
0,000753	0,378118	0,000748	0,133933	0,745	0,145040
0,000754	0,378118	0,000750	0,153683	0,746	0,145040
0,000755	0,378118	0,000751	0,174086	0,746	0,145040
0,000757	0,378118	0,000752	0,194200	0,747	0,145040
0,000758	0,378118	0,000754	0,214724	0,749	0,145040
0,000759	0,378118	0,000755	0,235452	0,750	0,145040
0,000761	0,400411	0,000756	0,255853	0,751	0,145040
0,000762	0,437847	0,000758	0,274832	0,753	0,145040
0,000763	0,472029	0,000759	0,291132	0,754	0,145040
0,000763	0,360512	0,000759	0,194169	0,755	0,145040

ДОДАТОК Б.

Чисельні результати імітаційного моделювання динаміки критеріїв руйнування

(метод оброблення – точіння , матеріал деталі – сталь 35;

режими різання $t=1,0$ мм, $S=0,25$ мм; $V=150$ м/хв)

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,008184	0,000	0,008541	0,000	0,016851
0,001	0,011724	0,001	0,008541	0,001	0,016851
0,001	0,011724	0,001	0,008541	0,001	0,016851
0,002	0,014652	0,002	0,008541	0,002	0,016851
0,002	0,025852	0,002	0,008541	0,002	0,016851
0,003	0,037391	0,003	0,008541	0,003	0,016851
0,004	0,046593	0,004	0,008541	0,004	0,016851
0,005	0,046593	0,005	0,008541	0,005	0,016851
0,006	0,046593	0,006	0,009707	0,006	0,016851
0,007	0,046593	0,007	0,013989	0,007	0,018200
0,009	0,046593	0,009	0,013989	0,009	0,018200
0,010	0,046593	0,010	0,013989	0,010	0,018200
0,012	0,046593	0,012	0,013989	0,012	0,018200
0,014	0,054124	0,014	0,013989	0,014	0,018200
0,015	0,067954	0,015	0,013989	0,015	0,018200
0,017	0,084023	0,017	0,013989	0,017	0,018200
0,020	0,102551	0,020	0,013989	0,020	0,018200
0,022	0,123135	0,022	0,013989	0,022	0,018200
0,022	0,123135	0,023	0,012489	0,022	0,016207
0,023	0,124960	0,025	0,012489	0,023	0,016207
0,025	0,124960	0,027	0,012489	0,025	0,016207
0,027	0,124960	0,028	0,012489	0,027	0,016207
0,028	0,124960	0,031	0,012489	0,028	0,016207
0,031	0,124960	0,032	0,012489	0,031	0,016207
0,032	0,124960	0,034	0,011588	0,032	0,016207
0,032	0,105673	0,037	0,011588	0,032	0,015181
0,034	0,105673	0,038	0,011588	0,034	0,015181
0,037	0,105673	0,042	0,011588	0,037	0,015181
0,038	0,105673	0,043	0,011588	0,038	0,015181
0,042	0,105730	0,047	0,011588	0,042	0,015181
0,043	0,106643	0,049	0,011588	0,043	0,015181
0,047	0,107936	0,052	0,011588	0,047	0,015181
0,049	0,108666	0,055	0,011161	0,049	0,015181
0,052	0,109033	0,059	0,011161	0,052	0,015181

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,056	0,114042	0,062	0,011161	0,052	0,014728
0,056	0,114522	0,063	0,011161	0,055	0,014728
0,056	0,114522	0,066	0,011794	0,059	0,014728
0,059	0,115427	0,066	0,011794	0,062	0,019951
0,062	0,115430	0,069	0,048653	0,063	0,020810
0,063	0,115439	0,072	0,048653	0,066	0,023073
0,066	0,115511	0,075	0,048653	0,066	0,023073
0,069	0,115583	0,078	0,048653	0,069	0,064459
0,072	0,115636	0,079	0,048653	0,072	0,064459
0,075	0,115682	0,082	0,026023	0,075	0,064459
0,078	0,115688	0,085	0,030122	0,078	0,064459
0,078	0,115688	0,088	0,033570	0,079	0,064459
0,079	0,115688	0,091	0,035871	0,079	0,035185
0,079	0,085338	0,095	0,036503	0,082	0,044419
0,082	0,085338	0,098	0,036503	0,085	0,053652
0,085	0,085338	0,101	0,036503	0,088	0,061644
0,089	0,085338	0,104	0,035845	0,091	0,067133
0,092	0,085338	0,107	0,035845	0,095	0,068662
0,095	0,085338	0,111	0,035845	0,098	0,068662
0,098	0,085338	0,114	0,035845	0,101	0,068662
0,101	0,085338	0,117	0,035845	0,101	0,068662
0,104	0,093330	0,120	0,035845	0,104	0,068662
0,107	0,112522	0,123	0,035845	0,107	0,068662
0,111	0,130713	0,127	0,035845	0,111	0,068662
0,114	0,146447	0,130	0,035845	0,114	0,068662
0,114	0,123627	0,133	0,035845	0,117	0,068662
0,117	0,123627	0,136	0,035845	0,120	0,068662
0,120	0,123627	0,139	0,035095	0,123	0,068662
0,123	0,123627	0,143	0,035095	0,127	0,068662
0,127	0,123627	0,146	0,035095	0,130	0,071738
0,130	0,123627	0,149	0,035095	0,133	0,089674
0,133	0,123627	0,152	0,035095	0,136	0,103450
0,136	0,123627	0,155	0,035095	0,136	0,085516
0,139	0,123627	0,158	0,035095	0,139	0,085516
0,143	0,123627	0,161	0,032140	0,143	0,085517
0,146	0,123627	0,164	0,032140	0,146	0,085519
0,149	0,123627	0,167	0,032140	0,149	0,085520
0,149	0,122550	0,171	0,032140	0,152	0,085520
0,152	0,122550	0,174	0,032140	0,155	0,085520
0,155	0,122550	0,177	0,032140	0,158	0,085520
0,159	0,122550	0,180	0,032140	0,158	0,068312
0,162	0,122550	0,183	0,034214	0,161	0,068312
0,165	0,122550	0,187	0,044096	0,164	0,068312

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,168	0,122550	0,190	0,052823	0,167	0,068312
0,171	0,122550	0,193	0,042349	0,171	0,068312
0,175	0,122550	0,196	0,042349	0,174	0,068312
0,178	0,122550	0,199	0,042349	0,177	0,068312
0,178	0,122550	0,203	0,042349	0,180	0,073408
0,181	0,122550	0,206	0,042349	0,183	0,110208
0,181	0,107442	0,209	0,042349	0,187	0,146008
0,184	0,107442	0,212	0,042349	0,190	0,178288
0,187	0,107442	0,215	0,042349	0,190	0,136585
0,191	0,107442	0,219	0,042349	0,193	0,136585
0,191	0,107442	0,222	0,042349	0,196	0,136585
0,194	0,107442	0,225	0,032911	0,199	0,136585
0,197	0,107442	0,228	0,032913	0,203	0,136585
0,200	0,107442	0,231	0,032913	0,206	0,136585
0,203	0,107442	0,235	0,032913	0,209	0,136585
0,207	0,107442	0,238	0,032913	0,212	0,136585
0,210	0,107442	0,241	0,032913	0,215	0,136585
0,213	0,107442	0,244	0,032913	0,219	0,136585
0,213	0,094647	0,247	0,039274	0,222	0,136585
0,216	0,095425	0,251	0,049731	0,222	0,095871
0,219	0,096155	0,254	0,059373	0,225	0,095879
0,223	0,096855	0,257	0,030048	0,228	0,095882
0,223	0,096855	0,260	0,030048	0,231	0,095884
0,226	0,097531	0,263	0,030048	0,235	0,095884
0,229	0,100300	0,267	0,030245	0,238	0,095884
0,232	0,103605	0,270	0,030245	0,241	0,095884
0,235	0,106434	0,273	0,030245	0,244	0,095884
0,239	0,109613	0,276	0,030245	0,247	0,102827
0,242	0,112364	0,279	0,035101	0,251	0,130951
0,242	0,110286	0,282	0,045079	0,254	0,157681
0,245	0,110286	0,286	0,054463	0,254	0,086715
0,248	0,110286	0,289	0,049885	0,257	0,086715
0,251	0,110286	0,292	0,049885	0,260	0,086715
0,255	0,112371	0,295	0,049885	0,263	0,086715
0,258	0,117894	0,298	0,049885	0,267	0,086715
0,261	0,122569	0,302	0,049885	0,270	0,086715
0,264	0,126650	0,305	0,049885	0,273	0,086715
0,267	0,130209	0,308	0,049885	0,276	0,086715
0,271	0,133372	0,311	0,045350	0,279	0,086715
0,274	0,136319	0,314	0,045350	0,282	0,102702
0,274	0,122575	0,318	0,045350	0,286	0,126418
0,277	0,124871	0,321	0,045350	0,286	0,117122
0,280	0,125682	0,321	0,045350	0,289	0,117122

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,283	0,126576	0,324	0,045350	0,292	0,117122
0,287	0,130333	0,327	0,045350	0,295	0,117122
0,290	0,134521	0,330	0,045350	0,298	0,117122
0,293	0,144356	0,334	0,045350	0,302	0,117122
0,296	0,153289	0,337	0,045350	0,305	0,117122
0,299	0,161788	0,340	0,045350	0,308	0,117122
0,303	0,170126	0,343	0,041852	0,308	0,107713
0,306	0,178604	0,346	0,041852	0,311	0,107713
0,306	0,136996	0,350	0,041852	0,314	0,107713
0,309	0,139792	0,353	0,041852	0,318	0,107713
0,312	0,142301	0,356	0,041852	0,321	0,107713
0,315	0,144618	0,359	0,041852	0,321	0,107713
0,319	0,147043	0,362	0,041852	0,324	0,107713
0,322	0,149806	0,366	0,046277	0,327	0,107713
0,325	0,152534	0,369	0,055680	0,330	0,107713
0,328	0,154785	0,372	0,063377	0,334	0,110099
0,331	0,156829	0,375	0,068021	0,337	0,138753
0,335	0,159281	0,378	0,041563	0,340	0,161600
0,338	0,161706	0,382	0,041563	0,340	0,124475
0,338	0,152373	0,385	0,041563	0,343	0,124475
0,341	0,152373	0,388	0,041563	0,346	0,124475
0,344	0,152373	0,391	0,041563	0,350	0,124475
0,347	0,152373	0,394	0,041563	0,353	0,124475
0,350	0,152373	0,398	0,041563	0,356	0,124475
0,354	0,152542	0,401	0,041563	0,359	0,124475
0,357	0,156421	0,404	0,039978	0,362	0,124475
0,360	0,159175	0,407	0,039978	0,366	0,124475
0,363	0,163727	0,410	0,039978	0,369	0,149063
0,366	0,176521	0,414	0,039978	0,372	0,170456
0,370	0,186961	0,417	0,039978	0,375	0,183582
0,370	0,170443	0,420	0,039978	0,375	0,115769
0,373	0,170443	0,423	0,041296	0,378	0,115769
0,376	0,170443	0,426	0,039978	0,382	0,115769
0,379	0,170443	0,430	0,039978	0,385	0,115769
0,382	0,170443	0,433	0,039978	0,388	0,115769
0,386	0,170443	0,436	0,039978	0,391	0,115769
0,389	0,170443	0,439	0,039978	0,394	0,115769
0,392	0,170443	0,442	0,039978	0,398	0,115769
0,395	0,170443	0,446	0,037369	0,401	0,115769
0,395	0,157688	0,449	0,037369	0,401	0,110780
0,398	0,157688	0,452	0,037369	0,404	0,110780
0,402	0,157688	0,455	0,037369	0,407	0,110780
0,405	0,157688	0,458	0,037369	0,410	0,110780

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,408	0,157688	0,462	0,037369	0,414	0,110780
0,411	0,157688	0,465	0,037369	0,417	0,110780
0,414	0,157688	0,468	0,037369	0,420	0,110780
0,418	0,157688	0,471	0,035057	0,423	0,116161
0,418	0,152308	0,474	0,035057	0,423	0,110780
0,421	0,152308	0,478	0,035057	0,426	0,110780
0,424	0,161107	0,481	0,035057	0,430	0,110780
0,427	0,178236	0,484	0,035057	0,433	0,110780
0,430	0,192259	0,487	0,035057	0,436	0,110780
0,434	0,202972	0,490	0,032529	0,439	0,110780
0,437	0,210313	0,494	0,032529	0,442	0,110780
0,440	0,214670	0,497	0,032529	0,442	0,102380
0,440	0,178109	0,500	0,032529	0,446	0,102380
0,443	0,178136	0,503	0,032529	0,449	0,102380
0,446	0,178155	0,506	0,035989	0,452	0,102380
0,450	0,178161	0,510	0,045178	0,455	0,102380
0,453	0,178162	0,513	0,039850	0,458	0,102380
0,456	0,183640	0,516	0,039850	0,462	0,102380
0,459	0,195996	0,519	0,039850	0,465	0,102380
0,462	0,209019	0,522	0,039850	0,468	0,102380
0,466	0,223008	0,526	0,041804	0,468	0,099938
0,466	0,193208	0,529	0,052977	0,471	0,099938
0,469	0,193208	0,529	0,033707	0,474	0,099938
0,472	0,193208	0,532	0,033707	0,478	0,099938
0,475	0,193208	0,535	0,033707	0,481	0,099938
0,478	0,193208	0,538	0,033707	0,484	0,099938
0,482	0,193208	0,542	0,033707	0,487	0,099938
0,485	0,193208	0,545	0,036748	0,487	0,089861
0,488	0,193208	0,548	0,035521	0,490	0,089861
0,488	0,167047	0,551	0,069121	0,494	0,089861
0,491	0,167047	0,554	0,069121	0,497	0,089861
0,494	0,167047	0,558	0,069121	0,500	0,089861
0,498	0,167047	0,561	0,069121	0,503	0,089861
0,501	0,167475	0,564	0,033487	0,506	0,089861
0,504	0,167970	0,567	0,033487	0,510	0,115703
0,507	0,169149	0,570	0,033487	0,510	0,100736
0,510	0,170422	0,574	0,033487	0,513	0,101200
0,510	0,168298	0,577	0,034010	0,516	0,101202
0,514	0,168298	0,580	0,032652	0,519	0,101202
0,514	0,168298	0,583	0,033050	0,522	0,101202
0,517	0,168298	0,586	0,041231	0,526	0,101202
0,520	0,168298	0,590	0,049344	0,529	0,101202
0,523	0,168488	0,593	0,057376	0,529	0,084893

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,526	0,169066	0,593	0,047612	0,529	0,084893
0,530	0,170072	0,596	0,047612	0,532	0,084893
0,530	0,165707	0,599	0,047612	0,535	0,084893
0,533	0,165707	0,602	0,047612	0,538	0,084893
0,533	0,165707	0,606	0,047612	0,542	0,084893
0,536	0,165707	0,609	0,047612	0,545	0,084893
0,539	0,165707	0,612	0,047612	0,545	0,078079
0,542	0,170106	0,615	0,047612	0,548	0,078079
0,546	0,180921	0,618	0,047615	0,551	0,090402
0,549	0,191321	0,618	0,047615	0,554	0,090402
0,549	0,161079	0,622	0,047805	0,558	0,090402
0,552	0,161079	0,625	0,047975	0,561	0,090402
0,555	0,161079	0,628	0,054018	0,561	0,074995
0,555	0,161079	0,631	0,064993	0,564	0,074995
0,558	0,161419	0,634	0,074645	0,567	0,074995
0,562	0,179240	0,638	0,053414	0,570	0,074995
0,565	0,194274	0,641	0,053893	0,574	0,074995
0,568	0,208015	0,641	0,053893	0,577	0,093884
0,568	0,169644	0,644	0,053893	0,577	0,084623
0,571	0,169644	0,647	0,053893	0,580	0,084623
0,574	0,169644	0,650	0,053893	0,583	0,084623
0,578	0,169644	0,654	0,053893	0,586	0,097588
0,581	0,169644	0,657	0,053893	0,590	0,121683
0,584	0,175984	0,660	0,051240	0,593	0,146520
0,587	0,184262	0,660	0,051240	0,593	0,121913
0,590	0,193373	0,663	0,051241	0,593	0,121913
0,590	0,184465	0,666	0,051244	0,596	0,121913
0,592	0,184465	0,670	0,051247	0,599	0,121913
0,596	0,184465	0,673	0,051566	0,602	0,121913
0,599	0,184465	0,676	0,046252	0,606	0,121913
0,602	0,184465	0,676	0,046252	0,609	0,121913
0,605	0,184465	0,679	0,046252	0,609	0,121913
0,608	0,184465	0,682	0,046252	0,612	0,121913
0,611	0,184465	0,686	0,046252	0,615	0,121913
0,615	0,189895	0,689	0,046252	0,618	0,121921
0,618	0,208774	0,692	0,046252	0,618	0,121921
0,618	0,168506	0,695	0,044626	0,622	0,122559
0,621	0,168506	0,698	0,044626	0,625	0,123027
0,624	0,168506	0,702	0,044626	0,628	0,141732
0,627	0,168506	0,705	0,044626	0,631	0,172347
0,631	0,168506	0,708	0,057328	0,634	0,199788
0,634	0,168506	0,711	0,070130	0,634	0,136712
0,634	0,168506	0,714	0,042606	0,638	0,139972

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,637	0,168506	0,718	0,042606	0,641	0,141367
0,640	0,168506	0,721	0,042606	0,641	0,141367
0,643	0,168506	0,724	0,042606	0,644	0,141367
0,647	0,168506	0,727	0,049422	0,647	0,141367
0,650	0,168592	0,730	0,063037	0,650	0,141367
0,650	0,163115	0,734	0,076738	0,654	0,141367
0,653	0,163195	0,737	0,051610	0,657	0,141367
0,656	0,163330	0,740	0,051610	0,657	0,133625
0,659	0,163450	0,743	0,051610	0,660	0,133625
0,663	0,163530	0,746	0,051610	0,660	0,133625
0,666	0,165115	0,750	0,057276	0,663	0,133627
0,669	0,169406	0,753	0,057276	0,666	0,133633
0,669	0,163417	0,756	0,057276	0,670	0,133642
0,672	0,163420	0,758	0,057276	0,673	0,167934
0,675	0,163433	0,761	0,057276	0,673	0,127098
0,679	0,163433	0,764	0,057276	0,676	0,127098
0,682	0,163433	0,768	0,057276	0,676	0,127098
0,685	0,163539	0,771	0,057276	0,679	0,127098
0,688	0,163943	0,774	0,057276	0,682	0,127098
0,688	0,163533	0,777	0,057276	0,686	0,127098
0,691	0,163842	0,780	0,048405	0,689	0,127098
0,695	0,164128	0,784	0,048405	0,692	0,127098
0,698	0,164379	0,787	0,048405	0,692	0,127098
0,701	0,164593	0,790	0,048405	0,695	0,127098
0,704	0,164774	0,793	0,048405	0,698	0,127100
0,704	0,163903	0,796	0,054484	0,702	0,127229
0,707	0,164074	0,800	0,040344	0,705	0,127344
0,711	0,164261	0,800	0,040344	0,708	0,151640
0,714	0,164427	0,803	0,040344	0,711	0,189618
0,717	0,164571	0,806	0,040344	0,711	0,113271
0,720	0,164702	0,809	0,040344	0,714	0,113271
0,720	0,164416	0,812	0,040344	0,718	0,113271
0,723	0,164594	0,816	0,040344	0,721	0,113271
0,727	0,164750	0,819	0,039740	0,724	0,113271
0,730	0,164878	0,819	0,039740	0,727	0,137336
0,733	0,165001	0,822	0,039740	0,730	0,184018
0,736	0,165100	0,825	0,039740	0,734	0,234376
0,739	0,165188	0,828	0,039740	0,734	0,150177
0,739	0,163979	0,832	0,041043	0,737	0,150177
0,743	0,163979	0,835	0,049965	0,740	0,150177
0,746	0,163979	0,838	0,039740	0,743	0,150177
0,749	0,163979	0,841	0,039740	0,746	0,150177
0,752	0,163979	0,844	0,039740	0,750	0,152255

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,755	0,163979	0,848	0,041415	0,750	0,152255
0,755	0,163979	0,851	0,054246	0,753	0,152255
0,759	0,164020	0,854	0,066809	0,756	0,152255
0,762	0,164054	0,854	0,048380	0,758	0,152255
0,765	0,164089	0,857	0,048380	0,761	0,152255
0,768	0,164108	0,860	0,048380	0,764	0,152255
0,771	0,164118	0,864	0,048380	0,768	0,152255
0,775	0,164121	0,867	0,048380	0,771	0,152255
0,775	0,164120	0,870	0,052621	0,774	0,152255
0,778	0,164154	0,873	0,045862	0,777	0,249846
0,781	0,164189	0,876	0,045862	0,777	0,129501
0,784	0,164214	0,880	0,045862	0,780	0,129501
0,787	0,165803	0,883	0,045862	0,784	0,129501
0,791	0,182735	0,886	0,045862	0,787	0,129501
0,791	0,163760	0,889	0,054818	0,790	0,136350
0,794	0,163760	0,892	0,044771	0,793	0,158318
0,797	0,163760	0,892	0,044771	0,796	0,180405
0,800	0,163760	0,896	0,044771	0,796	0,124710
0,803	0,163760	0,899	0,044771	0,800	0,124915
0,807	0,163760	0,902	0,044771	0,800	0,124915
0,807	0,163322	0,905	0,044771	0,803	0,124915
0,807	0,163327	0,908	0,044771	0,806	0,124915
0,810	0,163369	0,912	0,043326	0,809	0,124915
0,813	0,163399	0,915	0,043326	0,812	0,124915
0,817	0,163419	0,918	0,043326	0,816	0,124915
0,820	0,163431	0,921	0,043326	0,816	0,107879
0,823	0,163441	0,924	0,043326	0,819	0,107879
0,826	0,163444	0,928	0,039036	0,819	0,107879
0,829	0,163446	0,931	0,039036	0,822	0,107879
0,829	0,162898	0,934	0,039036	0,825	0,107879
0,833	0,162898	0,937	0,048152	0,828	0,107879
0,836	0,162898	0,940	0,057733	0,832	0,107879
0,839	0,162898	0,944	0,038816	0,835	0,121166
0,842	0,162898	0,947	0,038816	0,835	0,107879
0,842	0,162770	0,950	0,038816	0,838	0,107879
0,845	0,162771	0,953	0,039843	0,841	0,107879
0,849	0,162771	0,956	0,038694	0,844	0,107879
0,852	0,162771	0,960	0,038694	0,848	0,107879
0,855	0,162771	0,963	0,038694	0,851	0,129765
0,855	0,161609	0,966	0,038694	0,854	0,162409
0,858	0,161612	0,969	0,038694	0,854	0,119334
0,861	0,161613	0,972	0,039447	0,854	0,119334
0,865	0,161613	0,976	0,038694	0,857	0,119334

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,868	0,161613	0,979	0,038719	0,860	0,119334
0,871	0,161614	0,982	0,038815	0,864	0,119334
0,874	0,161616	0,985	0,049829	0,867	0,119334
0,874	0,161532	0,985	0,040647	0,870	0,122762
0,877	0,161532	0,988	0,040647	0,870	0,107951
0,881	0,161532	0,992	0,040647	0,873	0,108071
0,884	0,161532	0,995	0,040647	0,876	0,108071
0,887	0,161532	0,998	0,040647	0,880	0,108071
0,890	0,161532	0,999	0,040647	0,883	0,108071
0,890	0,160899	0,001002	0,040647	0,886	0,108071
0,893	0,160899	0,001005	0,040647	0,889	0,108071
0,897	0,160899	0,001008	0,040647	0,889	0,108071
0,900	0,160899	0,001012	0,040647	0,892	0,108071
0,903	0,160899	0,001015	0,040647	0,892	0,108071
0,906	0,160899	0,001018	0,036623	0,896	0,108071
0,909	0,160899	0,001021	0,036623	0,899	0,108071
0,909	0,160566	0,001024	0,036623	0,902	0,108071
0,913	0,160567	0,001028	0,037981	0,905	0,108071
0,916	0,160571	0,001031	0,037981	0,908	0,108071
0,919	0,160576	0,001034	0,045954	0,908	0,103914
0,922	0,160581	0,001037	0,055066	0,912	0,103914
0,925	0,160585	0,001040	0,064421	0,915	0,103914
0,929	0,160589	0,001044	0,073759	0,918	0,103914
0,929	0,159875	0,001044	0,051560	0,921	0,103914
0,932	0,159875	0,001047	0,051560	0,924	0,108885
0,935	0,159875	0,001050	0,051560	0,924	0,099971
0,938	0,159875	0,001053	0,051560	0,928	0,099971
0,938	0,159636	0,001056	0,051560	0,931	0,099971
0,941	0,159643	0,001060	0,051560	0,934	0,099971
0,945	0,159648	0,001063	0,051575	0,937	0,118624
0,948	0,159653	0,001066	0,051699	0,940	0,141443
0,951	0,162112	0,001069	0,055002	0,940	0,096660
0,954	0,173087	0,001072	0,068594	0,944	0,096660
0,954	0,159136	0,001076	0,050650	0,947	0,096660
0,957	0,159141	0,001079	0,050650	0,950	0,096660
0,961	0,159148	0,001082	0,059182	0,953	0,096660
0,964	0,159155	0,001085	0,068658	0,953	0,090822
0,967	0,159162	0,001085	0,054652	0,956	0,090822
0,967	0,158759	0,001088	0,054652	0,960	0,090822
0,970	0,158760	0,001092	0,054652	0,963	0,090822
0,973	0,158762	0,001095	0,054652	0,966	0,090822
0,977	0,158764	0,001098	0,054652	0,969	0,090822
0,980	0,158767	0,001101	0,055658	0,972	0,090822

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,983	0,166851	0,001104	0,055289	0,972	0,090822
0,983	0,158403	0,001108	0,055289	0,976	0,090822
0,986	0,158415	0,001111	0,055289	0,979	0,090898
0,989	0,158427	0,001114	0,055289	0,982	0,091135
0,992	0,158437	0,001117	0,055289	0,985	0,108131
0,996	0,158441	0,001120	0,049970	0,985	0,088261
0,999	0,158445	0,001124	0,049970	0,985	0,088261
0,001002	0,158449	0,001127	0,049970	0,988	0,088261
0,001002	0,158340	0,001130	0,049970	0,992	0,088261
0,001005	0,158341	0,001133	0,049970	0,995	0,088261
0,001005	0,158341	0,001136	0,049970	0,998	0,090400
0,001008	0,163828	0,001140	0,049970	0,998	0,090182
0,001012	0,172823	0,001143	0,049970	0,999	0,090183
0,001015	0,179698	0,001146	0,047465	0,001002	0,090189
0,001018	0,184284	0,001149	0,047465	0,001005	0,090189
0,001018	0,158112	0,001152	0,047465	0,001008	0,090189
0,001021	0,158118	0,001156	0,047465	0,001012	0,090189
0,001024	0,158125	0,001159	0,047465	0,001015	0,090189
0,001028	0,161199	0,001159	0,045199	0,001015	0,082963
0,001031	0,167398	0,001162	0,045199	0,001018	0,082963
0,001034	0,172313	0,001165	0,045199	0,001021	0,082963
0,001034	0,158051	0,001168	0,045199	0,001024	0,082963
0,001037	0,158058	0,001172	0,045199	0,001028	0,082963
0,001040	0,158065	0,001175	0,045199	0,001028	0,082963
0,001044	0,164329	0,001178	0,045199	0,001031	0,083000
0,001047	0,171125	0,001181	0,045199	0,001034	0,102980
0,001050	0,177728	0,001184	0,045199	0,001037	0,125453
0,001050	0,171448	0,001188	0,045199	0,001040	0,148912
0,001053	0,171448	0,001191	0,046955	0,001044	0,172667
0,001056	0,171448	0,001194	0,043198	0,001044	0,117985
0,001060	0,171448	0,001197	0,043198	0,001044	0,117985
0,001063	0,171448	0,001200	0,043198	0,001047	0,117985
0,001063	0,157493	0,001204	0,043198	0,001050	0,117985
0,001066	0,157495	0,001207	0,042881	0,001053	0,117985
0,001069	0,157496	0,001210	0,042881	0,001056	0,123196
0,001072	0,157497	0,001213	0,042881	0,001056	0,123196
0,001076	0,157498	0,001216	0,042881	0,001060	0,123196
0,001079	0,157499	0,001220	0,042422	0,001063	0,123253
0,001082	0,157500	0,001223	0,042422	0,001066	0,123569
0,001082	0,157412	0,001226	0,042422	0,001069	0,123674
0,001085	0,157413	0,001229	0,042422	0,001072	0,149174
0,001088	0,157415	0,001232	0,041469	0,001072	0,116540
0,001092	0,157416	0,001236	0,041469	0,001076	0,116540

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,001095	0,157418	0,001239	0,041469	0,001079	0,116540
0,001098	0,157420	0,001242	0,041469	0,001082	0,131489
0,001101	0,157421	0,001245	0,041469	0,001085	0,154858
0,001101	0,157146	0,001248	0,041469	0,001085	0,123523
0,001104	0,157149	0,001252	0,041469	0,001085	0,123523
0,001108	0,157153	0,001255	0,041469	0,001088	0,123523
0,001111	0,157156	0,001258	0,041469	0,001092	0,123523
0,001114	0,157159	0,001261	0,041469	0,001095	0,123523
0,001117	0,157162	0,001264	0,041469	0,001098	0,123523
0,001120	0,157164	0,001268	0,041469	0,001101	0,128410
0,001120	0,156872	0,001271	0,040074	0,001101	0,126972
0,001124	0,156873	0,001274	0,040074	0,001104	0,127010
0,001127	0,156874	0,001274	0,040074	0,001108	0,127010
0,001130	0,156874	0,001277	0,040074	0,001111	0,127010
0,001133	0,156876	0,001280	0,040074	0,001114	0,127010
0,001136	0,156878	0,001284	0,040074	0,001117	0,127010
0,001136	0,156763	0,001287	0,040074	0,001117	0,114337
0,001140	0,156763	0,001290	0,040074	0,001120	0,114337
0,001143	0,156763	0,001293	0,040074	0,001124	0,114337
0,001146	0,156763	0,001296	0,040074	0,001127	0,114337
0,001149	0,156763	0,001300	0,040074	0,001130	0,114337
0,001152	0,156763	0,001303	0,040074	0,001133	0,114337
0,001152	0,156438	0,001306	0,040074	0,001136	0,114337
0,001156	0,156438	0,001309	0,035662	0,001140	0,114337
0,001159	0,156438	0,001312	0,035662	0,001143	0,114337
0,001162	0,156438	0,001316	0,035662	0,001143	0,108988
0,001165	0,156438	0,001319	0,035662	0,001146	0,108988
0,001165	0,155993	0,001322	0,035662	0,001149	0,108988
0,001168	0,155993	0,001325	0,035510	0,001152	0,108988
0,001172	0,155993	0,001328	0,035510	0,001156	0,108988
0,001175	0,155993	0,001332	0,035510	0,001159	0,108988
0,001178	0,155993	0,001335	0,035510	0,001159	0,103742
0,001181	0,155993	0,001338	0,035510	0,001159	0,103742
0,001184	0,155993	0,001338	0,033043	0,001162	0,103742
0,001184	0,155715	0,001341	0,033043	0,001165	0,103742
0,001188	0,155715	0,001344	0,033811	0,001168	0,103742
0,001191	0,155715	0,001348	0,042186	0,001172	0,103742
0,001194	0,155715	0,001351	0,050776	0,001172	0,103742
0,001197	0,155715	0,001354	0,036001	0,001175	0,103742
0,001197	0,155556	0,001357	0,036001	0,001178	0,103742
0,001200	0,155556	0,001360	0,036001	0,001181	0,103742
0,001204	0,155556	0,001364	0,036001	0,001184	0,103742
0,001207	0,155556	0,001367	0,036001	0,001188	0,103742

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,001210	0,155556	0,001370	0,036653	0,001191	0,103742
0,001213	0,155556	0,001373	0,037857	0,001191	0,099078
0,001216	0,155556	0,001376	0,037857	0,001194	0,099078
0,001216	0,155185	0,001380	0,037857	0,001197	0,099078
0,001220	0,155185	0,001383	0,037857	0,001200	0,099078
0,001223	0,155185	0,001386	0,037857	0,001204	0,099078
0,001226	0,155185	0,001389	0,037857	0,001204	0,098398
0,001229	0,155185	0,001392	0,032884	0,001207	0,098398
0,001229	0,154866	0,001396	0,032884	0,001210	0,098398
0,001232	0,154866	0,001399	0,032884	0,001213	0,098398
0,001236	0,154866	0,001402	0,032884	0,001216	0,098398
0,001239	0,154866	0,001405	0,032884	0,001216	0,097323
0,001242	0,158206	0,001406	0,029594	0,001220	0,097323
0,001245	0,164524	0,001410	0,029594	0,001223	0,097323
0,001245	0,154563	0,001413	0,029594	0,001226	0,097323
0,001248	0,154563	0,001416	0,029594	0,001229	0,097323
0,001252	0,154563	0,001419	0,029229	0,001229	0,095051
0,001255	0,154563	0,001422	0,029229	0,001232	0,095051
0,001258	0,154563	0,001426	0,029656	0,001236	0,095051
0,001258	0,154563	0,001429	0,032657	0,001239	0,095051
0,001261	0,154563	0,001430	0,030316	0,001242	0,095051
0,001264	0,154563	0,001433	0,030316	0,001245	0,095051
0,001264	0,154563	0,001436	0,030316	0,001248	0,095051
0,001268	0,154563	0,001439	0,034963	0,001248	0,095051
0,001268	0,154563	0,001443	0,044990	0,001252	0,095051
0,001271	0,154563	0,001446	0,055081	0,001255	0,095051
0,001274	0,154563	0,001449	0,047347	0,001258	0,095051
0,001277	0,154563	0,001452	0,047347	0,001261	0,095051
0,001280	0,156189	0,001455	0,047347	0,001264	0,095051
0,001284	0,170735	0,001459	0,047347	0,001268	0,095051
0,001284	0,154484	0,001462	0,047347	0,001268	0,091749
0,001287	0,154484	0,001465	0,041008	0,001271	0,091749
0,001290	0,154484	0,001468	0,041008	0,001274	0,091749
0,001293	0,154484	0,001471	0,041008	0,001274	0,091749
0,001296	0,154484	0,001475	0,041008	0,001277	0,091749
0,001296	0,154172	0,001478	0,047023	0,001280	0,091749
0,001297	0,154172	0,001481	0,047023	0,001284	0,091749
0,001300	0,154172	0,001484	0,047023	0,001287	0,091749
0,001303	0,154172	0,001487	0,048903	0,001287	0,091749
0,001306	0,154172	0,001491	0,055993	0,001290	0,091749
0,001310	0,154172	0,001494	0,062936	0,001293	0,091749
0,001313	0,154172	0,001497	0,053617	0,001296	0,091749
0,001316	0,163366	0,001500	0,053617	0,001300	0,091749

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,001316	0,153944	0,001503	0,053617	0,001303	0,091749
0,001319	0,153944	0,001507	0,053617	0,001306	0,091749
0,001322	0,153944	0,001510	0,047266	0,001306	0,081365
0,001326	0,153944	0,001513	0,047266	0,001309	0,081365
0,001329	0,153944	0,001516	0,047266	0,001312	0,081365
0,001332	0,153944	0,001519	0,047266	0,001316	0,081365
0,001332	0,153503	0,001523	0,047266	0,001319	0,081365
0,001335	0,153503	0,001526	0,047266	0,001322	0,081365
0,001338	0,153503	0,001529	0,045921	0,001322	0,081039
0,001342	0,153503	0,001532	0,045921	0,001325	0,081039
0,001345	0,153503	0,001535	0,045921	0,001328	0,081039
0,001348	0,153503	0,001539	0,045921	0,001332	0,081039
0,001351	0,153503	0,001542	0,045921	0,001335	0,081039
0,001354	0,153503	0,001542	0,045921	0,001338	0,081039
0,001354	0,153148	0,001545	0,045921	0,001338	0,075370
0,001358	0,153148	0,001548	0,045921	0,001338	0,075370
0,001361	0,153148	0,001551	0,045921	0,001341	0,075370
0,001364	0,153148	0,001555	0,045921	0,001344	0,080743
0,001367	0,153148	0,001558	0,045921	0,001348	0,102509
0,001370	0,153148	0,001561	0,045921	0,001351	0,126207
0,001370	0,153061	0,001564	0,047320	0,001351	0,080959
0,001374	0,153061	0,001567	0,041219	0,001354	0,080959
0,001377	0,153061	0,001571	0,041219	0,001357	0,080959
0,001380	0,153061	0,001574	0,051241	0,001360	0,080959
0,001383	0,153061	0,001577	0,068175	0,001364	0,082390
0,001386	0,153061	0,001580	0,084914	0,001367	0,086750
0,001386	0,153008	0,001580	0,074241	0,001370	0,090828
0,001390	0,153008	0,001583	0,075018	0,001373	0,093999
0,001393	0,153008	0,001587	0,075649	0,001373	0,089286
0,001396	0,153008	0,001590	0,076237	0,001376	0,089286
0,001399	0,153008	0,001593	0,076763	0,001380	0,089286
0,001402	0,153008	0,001596	0,077225	0,001383	0,089286
0,001406	0,153008	0,001599	0,059797	0,001386	0,089286
0,001406	0,152639	0,001603	0,059951	0,001389	0,089286
0,001409	0,152639	0,001606	0,060100	0,001389	0,078915
0,001412	0,152639	0,001609	0,060232	0,001392	0,078915
0,001415	0,152639	0,001612	0,060345	0,001396	0,078915
0,001418	0,152639	0,001615	0,060443	0,001399	0,078915
0,001422	0,152639	0,001619	0,053292	0,001402	0,078915
0,001425	0,152639	0,001622	0,053294	0,001405	0,078915
0,001425	0,152560	0,001625	0,053295	0,001405	0,068177
0,001428	0,152560	0,001628	0,053295	0,001406	0,068177
0,001431	0,152560	0,001631	0,053295	0,001410	0,068177

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,001434	0,152560	0,001635	0,048488	0,001413	0,068177
0,001438	0,152560	0,001638	0,054368	0,001416	0,068177
0,001441	0,152560	0,001641	0,062286	0,001416	0,068177
0,001443	0,152560	0,001644	0,069663	0,001419	0,068177
0,001443	0,152519	0,001647	0,076504	0,001422	0,068177
0,001446	0,152519	0,001651	0,082836	0,001426	0,068177
0,001449	0,152519	0,001654	0,055337	0,001429	0,074625
0,001452	0,152519	0,001657	0,055337	0,001429	0,068498
0,001456	0,152519	0,001660	0,055337	0,001430	0,068787
0,001459	0,152519	0,001663	0,055337	0,001433	0,068787
0,001459	0,152295	0,001667	0,055337	0,001436	0,068787
0,001462	0,152295	0,001670	0,055337	0,001439	0,074391
0,001465	0,152295	0,001673	0,056586	0,001443	0,096035
0,001468	0,154959	0,001676	0,063773	0,001446	0,118477
0,001468	0,154959	0,001679	0,070669	0,001446	0,102106
0,001472	0,165297	0,001683	0,076801	0,001449	0,102106
0,001475	0,175883	0,001686	0,081800	0,001452	0,102106
0,001475	0,152156	0,001689	0,086367	0,001455	0,102106
0,001478	0,152156	0,001692	0,090705	0,001459	0,102106
0,001481	0,152156	0,001692	0,076564	0,001462	0,102106
0,001484	0,152156	0,001695	0,076564	0,001462	0,087917
0,001488	0,152156	0,001699	0,076564	0,001465	0,087917
0,001491	0,152156	0,001702	0,076564	0,001468	0,087917
0,001491	0,151928	0,001705	0,076564	0,001471	0,087917
0,001494	0,151928	0,001708	0,076564	0,001475	0,093491
0,001497	0,151928	0,001711	0,076564	0,001478	0,111201
0,001500	0,151928	0,001715	0,073436	0,001478	0,111201
0,001504	0,151928	0,001718	0,073436	0,001481	0,111201
0,001507	0,151928	0,001721	0,073436	0,001484	0,111201
0,001510	0,151928	0,001724	0,073436	0,001487	0,116240
0,001510	0,151766	0,001727	0,073436	0,001491	0,134330
0,001513	0,151766	0,001731	0,073436	0,001494	0,152212
0,001516	0,151766	0,001734	0,070824	0,001494	0,128755
0,001520	0,151766	0,001737	0,071672	0,001497	0,128755
0,001523	0,151766	0,001740	0,081075	0,001500	0,128755
0,001526	0,151766	0,001743	0,107974	0,001503	0,128755
0,001529	0,151766	0,001747	0,084828	0,001507	0,128755
0,001529	0,151433	0,001750	0,084828	0,001507	0,112931
0,001532	0,151433	0,001753	0,084828	0,001510	0,112931
0,001536	0,151433	0,001756	0,084828	0,001513	0,112931
0,001539	0,151433	0,001759	0,084828	0,001516	0,112931
0,001542	0,151433	0,001762	0,066249	0,001519	0,112931
0,001545	0,151433	0,001765	0,066249	0,001523	0,112931

Час, мс	Критерій Кокрофта- Лейтема	Час, мс	Критерій Райса- Трейсі	Час, мс	Критерій Мак- Клінтока
0,001548	0,151433	0,001768	0,066249	0,001526	0,112931
0,001548	0,151083	0,001771	0,066249	0,001526	0,109438
0,001552	0,151083	0,001774	0,066249	0,001529	0,109438
0,001555	0,151083	0,001777	0,066249	0,001532	0,109438
0,001558	0,151083	0,001780	0,059126	0,001535	0,109438
0,001561	0,151083	0,001783	0,059156	0,001539	0,109438
0,001564	0,151083	0,001787	0,059177	0,001542	0,109438
0,001567	0,151083	0,001790	0,059192	0,001542	0,109438
0,001567	0,150937	0,001793	0,066084	0,001545	0,109438
0,001570	0,150937	0,001796	0,058949	0,001548	0,109438
0,001574	0,150937	0,001799	0,059471	0,001548	0,109438
0,001577	0,150937	0,001803	0,061080	0,001551	0,109438
0,001580	0,150937	0,001806	0,069264	0,001555	0,109438
0,001583	0,150937	0,001809	0,076803	0,001558	0,109438
0,001583	0,150810	0,001812	0,074619	0,001561	0,109438
0,001586	0,150810	0,001815	0,074619	0,001564	0,109438
0,001590	0,150810	0,001819	0,074619	0,001564	0,097831
0,001593	0,150810	0,001822	0,074619	0,001567	0,097831
0,001596	0,150810	0,001825	0,074619	0,001571	0,097831
0,001599	0,150810	0,001828	0,069024	0,001574	0,097831
0,001602	0,150810	0,001831	0,072472	0,001577	0,097831
0,001602	0,150372	0,001835	0,075260	0,001580	0,106953
0,001606	0,150372	0,001838	0,077858	0,001580	0,097831
0,001609	0,150372	0,001841	0,080197	0,001580	0,097831
0,001612	0,150444	0,001844	0,080509	0,001583	0,097831
0,001615	0,163046	0,001847	0,081019	0,001587	0,097831
0,001617	0,168802	0,001851	0,081408	0,001590	0,097831
0,001620	0,180661	0,001854	0,081790	0,001593	0,097959
0,001623	0,192397	0,001857	0,078490	0,001596	0,098707
0,001626	0,203979	0,001860	0,078573	0,001596	0,095566
0,001626	0,177668	0,001863	0,078639	0,001599	0,095566

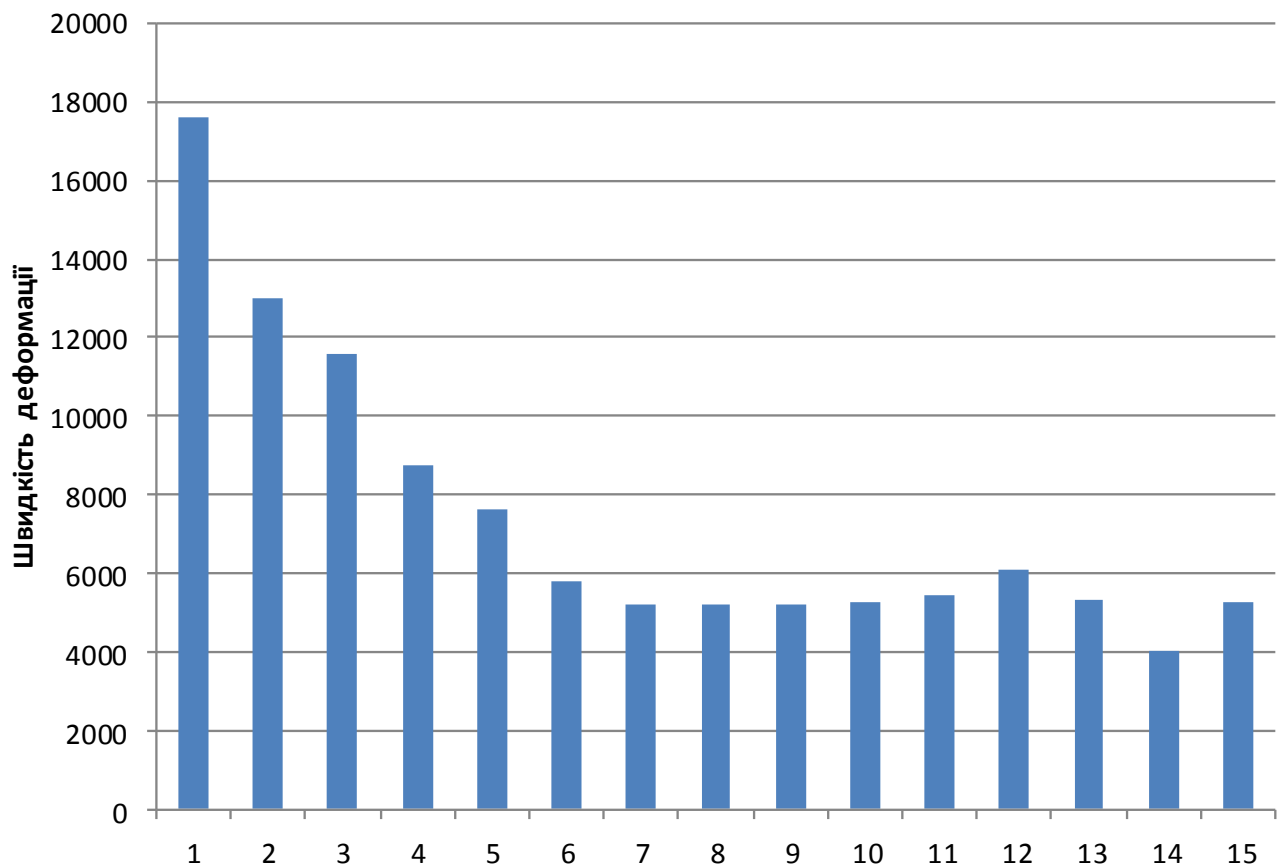
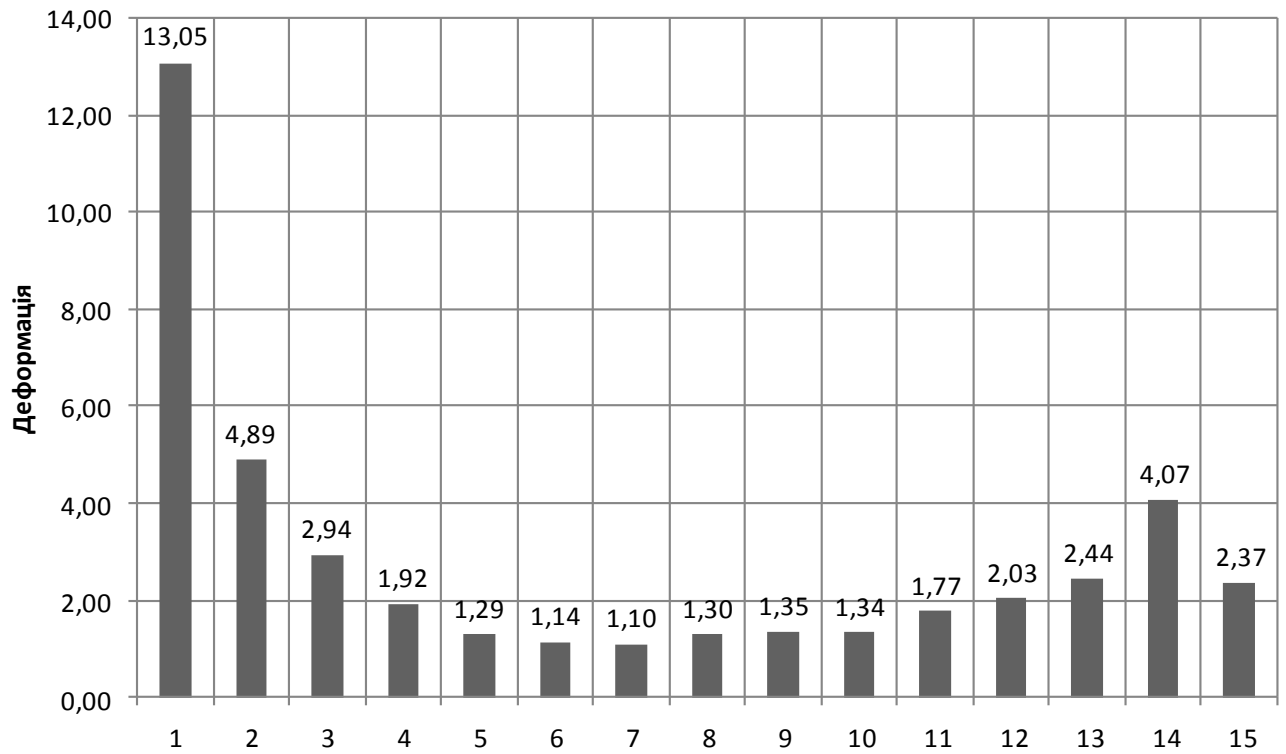
ДОДАТОК В

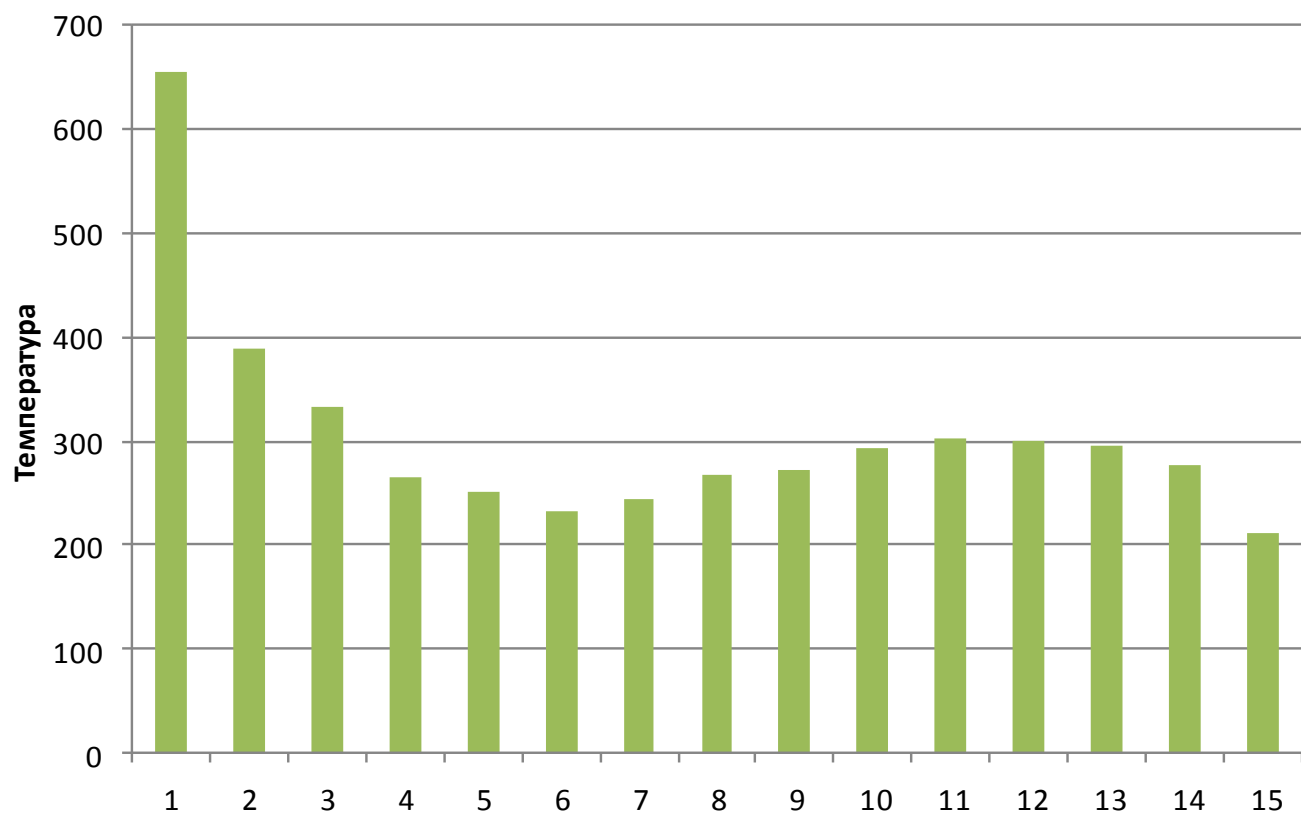
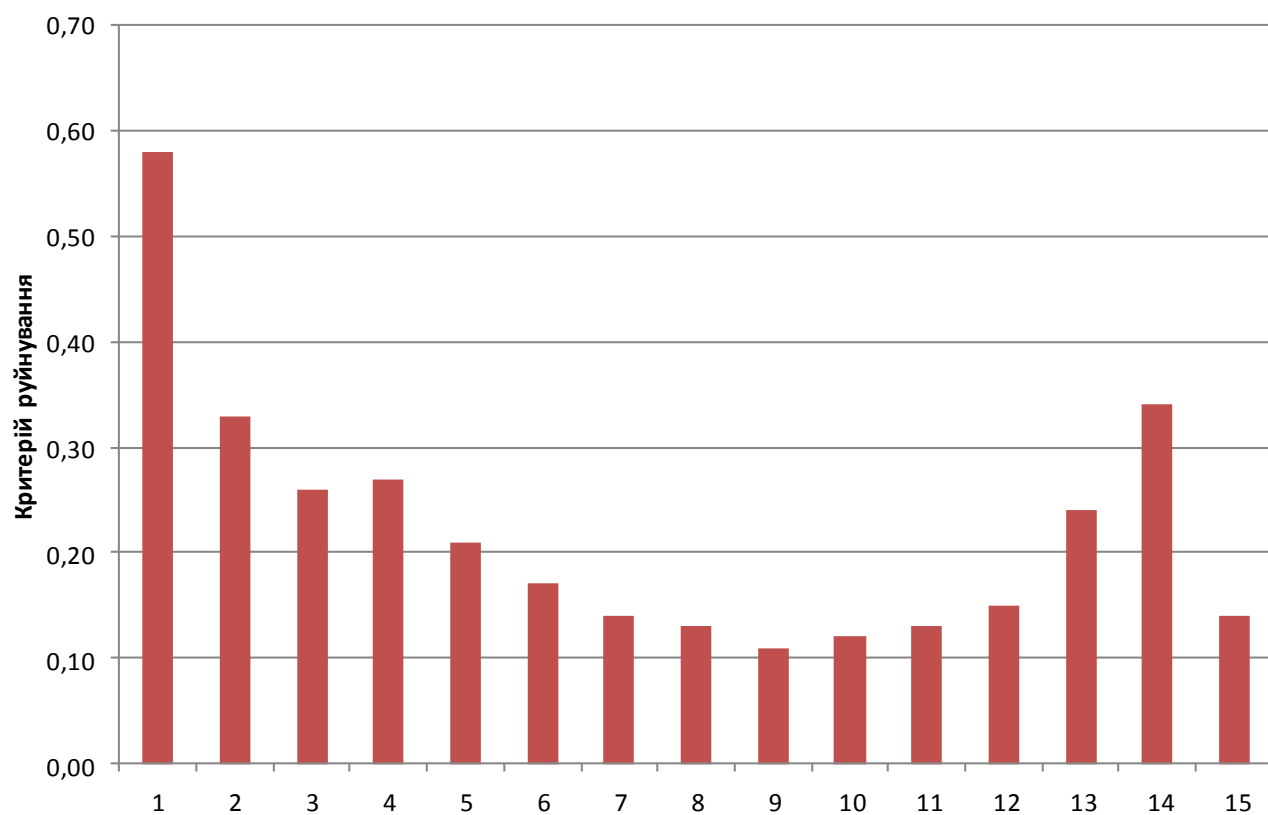
Результати імітаційно-реологічного моделювання при механічному
обробленні деталі з титанового сплаву ВТ6

В1. Числові значення напружено-деформаційних та термодинамічних
параметрів в характерних точках площини зсуву
(за базовими точками – рис.2.32).

№ точки	Деформація (мм/мм)	Швидкість поширення деформації (мм/мм/с)	Енергетич- ний критерій руйнування (Кокрофта- Лейтема)	Темпера- тура (°С)	Середні напруження (МПа)	Еквівалентні напруження Мізеса (МПа)
1	13,05	17617	0,58	655	1094	1177
2	4,89	12987	0,33	390	844	1157
3	2,94	11554	0,26	333	663	1162
4	1,92	8751	0,27	265	579	1149
5	1,29	7644	0,21	252	561	1142
6	1,14	5809	0,17	233	498	1133
7	1,10	5219	0,14	244	494	1125
8	1,30	5182	0,13	268	519	1123
9	1,35	5184	0,11	272	542	1119
10	1,34	5253	0,12	293	561	1120
11	1,77	5458	0,13	303	580	1122
12	2,03	6092	0,15	300	595	1126
13	2,44	5323	0,24	295	556	1117
14	4,07	4045	0,34	278	529	1089
15	2,37	5276	0,14	211	770	1115

В2. Результати аналізу деформаційних, силових та температурних характеристик вздовж площини зсуву стружки (за базовими точками – рис.2.32)





ДОДАТОК Г

Результати імітаційно-реологічного моделювання сил різання при обробленні конструкційних сталей

(подача $S=0,25$ мм; глибина різання $t=1$ мм; швидкість різання $V=120$ мм/хв)

Г1. Числові значення силових параметрів різання при обробленні деталі зі сталі 20.

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0	0,000	0	0	0
0,01	2191,71	394,17	2226,87	0,005	758,85	7,73	758,893	0,008	571,61	0,14389	571,61
0,02	2264,74	464,42	2311,87	0,015	1230,98	108,65	1235,77	0,018	993,597	0,97691	993,597
0,03	2310,38	522,33	2368,69	0,030	1527,63	182,32	1538,47	0,023	1073,41	4,8804	1073,42
0,03	2327,01	540,09	2388,86	0,034	1571,42	194,38	1583,4	0,037	1263	33,91	1263,46
0,05	2362,51	549,14	2425,49	0,053	1747,40	298,26	1772,67	0,049	1355,59	44,2705	1356,31
0,05	2370,42	559,04	2435,45	0,074	1827,80	331,66	1857,65	0,066	1485,08	59,2781	1486,26
0,08	2409,15	538,86	2468,68	0,077	1839,00	336,33	1869,5	0,095	1626,19	26,2761	1626,4
0,10	2453,07	598,59	2525,05	0,100	1892,64	349,42	1924,62	0,125	1735,19	87,9037	1737,42
0,11	2462,87	521,70	2517,52	0,109	1907,37	372,82	1943,46	0,135	1755,92	40,7691	1756,39
0,13	2479,17	582,87	2546,77	0,133	1943,44	384,06	1981,02	0,165	1809,74	26,0087	1809,93
0,15	2510,95	616,45	2585,51	0,140	1949,37	336,03	1978,12	0,175	1834,89	61,6993	1835,93
0,15	2496,82	559,31	2558,70	0,168	1975,61	391,03	2013,94	0,199	1871,98	21,8355	1872,11
0,18	2524,78	628,58	2601,85	0,175	1981,82	334,50	2009,85	0,212	1874,06	66,4927	1875,24
0,18	2525,46	625,73	2601,82	0,204	2005,80	419,58	2049,21	0,239	1911,66	56,0988	1912,48
0,19	2536,04	615,77	2609,73	0,210	2011,18	340,34	2039,77	0,250	1927,54	85,6438	1929,44

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,21	2547,82	605,39	2618,76	0,242	2028,81	360,27	2060,55	0,279	1938,08	71,3174	1939,39
0,21	2549,95	621,90	2624,69	0,245	2021,58	358,66	2053,15	0,296	1940,01	109,847	1943,12
0,23	2560,05	634,68	2637,55	0,278	2039,02	355,61	2069,8	0,320	1955,14	59,2905	1956,04
0,24	2563,19	590,77	2630,39	0,319	2038,22	400,13	2077,12	0,325	1972,63	93,4939	1974,84
0,25	2579,01	609,50	2650,05	0,357	2042,63	393,30	2080,15	0,350	1991,19	64,7982	1992,24
0,26	2578,96	618,55	2652,10	0,365	2043,15	308,69	2066,34	0,365	1994,75	125,867	1998,72
0,27	2564,20	630,84	2640,66	0,399	2044,56	377,19	2079,06	0,392	1982,63	99,3134	1985,12
0,29	2570,79	627,59	2646,29	0,411	2051,84	321,94	2076,94	0,412	1993,79	43,1189	1994,26
0,29	2569,68	632,30	2646,33	0,437	2049,16	354,96	2079,68	0,453	1991,91	103,566	1994,6
0,30	2575,70	605,73	2645,97	0,447	2053,99	411,40	2094,79	0,457	2012,01	107,207	2014,86
0,32	2582,32	603,97	2652,01	0,467	2054,03	371,43	2087,34	0,498	2017,34	106,697	2020,16
0,32	2585,85	618,56	2658,80	0,495	2056,34	391,03	2093,19	0,531	2009,63	94,842	2011,87
0,34	2579,53	616,26	2652,12	0,512	2045,66	321,21	2070,72	0,546	2001,52	47,0985	2002,07
0,35	2602,58	658,47	2684,59	0,536	2064,40	356,17	2094,9	0,556	2005,15	74,4097	2006,53
0,36	2597,21	632,04	2673,01	0,548	2073,67	389,59	2109,95	0,575	1986,67	36,04	1987
0,38	2591,49	614,96	2663,46	0,581	2075,82	377,00	2109,78	0,586	2011,6	121,598	2015,27
0,38	2595,42	631,21	2671,07	0,594	2082,79	391,89	2119,34	0,601	2004,78	46,708	2005,32
0,40	2593,27	612,67	2664,66	0,619	2085,52	365,42	2117,29	0,632	2020,04	67,56	2021,17
0,40	2613,36	607,98	2683,15	0,623	2090,13	378,95	2124,2	0,642	2007,14	79,1426	2008,7
0,42	2607,74	632,19	2683,28	0,648	2078,72	386,11	2114,27	0,663	2015,63	57,7461	2016,46
0,43	2614,86	632,59	2690,29	0,666	2090,82	409,79	2130,6	0,678	2032,28	33,9137	2032,56
0,44	2613,62	640,88	2691,05	0,683	2086,09	389,00	2122,05	0,683	2032,52	43,6121	2032,99
0,46	2618,28	635,29	2694,25	0,704	2101,18	351,72	2130,41	0,702	2012,54	43,4687	2013,01
0,47	2632,35	653,84	2712,34	0,721	2083,37	393,10	2120,13	0,727	2023,23	65,401	2024,29

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,47	2617,83	609,66	2687,88	0,749	2097,31	376,82	2130,89	0,749	2028,54	58,483	2029,38
0,49	2625,47	632,03	2700,47	0,754	2102,86	393,33	2139,33	0,770	2032,6	52,3471	2033,27
0,50	2624,25	638,50	2700,81	0,788	2099,72	388,03	2135,27	0,775	2045,09	125,161	2048,92
0,52	2624,80	638,26	2701,29	0,795	2104,22	393,67	2140,73	0,795	2021,88	52,5004	2022,56
0,52	2634,54	666,05	2717,43	0,827	2099,69	375,08	2132,93	0,824	2038,78	69,2866	2039,96
0,54	2630,37	631,61	2705,14	0,870	2106,84	392,14	2143,02	0,837	2039,05	82,2633	2040,71
0,55	2633,50	626,71	2707,04	0,874	2113,69	398,79	2150,98	0,869	2043,44	90,4415	2045,44
0,56	2635,28	621,70	2707,62	0,900	2108,63	363,83	2139,79	0,878	2040,34	13,1181	2040,38
0,58	2640,46	634,39	2715,60	0,913	2116,41	416,18	2156,94	0,900	2028,13	44,3866	2028,62
0,58	2657,08	665,49	2739,15	0,940	2114,99	398,32	2152,17	0,921	2043,37	68,203	2044,51
0,60	2642,94	637,71	2718,79	0,956	2122,45	406,62	2161,05	0,958	2054,47	91,2505	2056,5
0,61	2648,58	608,57	2717,60	0,975	2126,66	392,77	2162,63	0,963	2057,42	90,2612	2059,4
0,62	2634,09	614,92	2704,91	0,997	2111,94	349,14	2140,6	1,000	2049,39	106,985	2052,18
0,63	2652,26	639,00	2728,15	1,008	2114,11	372,50	2146,68	1,011	2064,38	107,422	2067,17
0,64	2664,16	670,35	2747,20	1,047	2112,92	399,60	2150,37	1,027	2046,05	53,6247	2046,75
0,65	2640,57	617,04	2711,70	1,088	2117,06	402,57	2155	1,050	2049,73	56,6473	2050,51
0,67	2656,63	615,66	2727,04	1,091	2118,95	324,77	2143,69	1,064	2065,49	98,7342	2067,85
0,67	2668,80	677,51	2753,45	1,133	2132,51	391,74	2168,19	1,088	2054,6	89,9232	2056,57
0,69	2654,51	637,80	2730,06	1,173	2125,49	402,96	2163,35	1,112	2066,26	74,0177	2067,59
0,70	2665,93	612,46	2735,38	1,181	2134,61	407,86	2173,23	1,121	2058,63	80,3525	2060,2
0,72	2657,88	549,76	2714,14	1,216	2125,13	354,89	2154,56	1,148	2047,02	65,8977	2048,08
0,73	2663,32	608,14	2731,87	1,220	2138,88	409,01	2177,64	1,162	2075,99	101,408	2078,47
0,73	2665,15	632,14	2739,09	1,255	2116,08	395,57	2152,74	1,186	2041,72	13,474	2041,76
0,75	2667,68	648,58	2745,39	1,264	2135,73	402,52	2173,33	1,204	2069,17	18,7295	2069,25

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,76	2674,80	674,01	2758,41	1,296	2135,03	410,03	2174,05	1,230	2051,29	104,413	2053,95
0,77	2663,06	640,13	2738,91	1,308	2143,99	416,37	2184,05	1,254	2051,06	59,9109	2051,93
0,78	2675,64	619,50	2746,42	1,341	2138,27	398,76	2175,13	1,275	2074,8	43,9846	2075,27
0,79	2667,81	651,70	2746,26	1,341	2137,61	378,12	2170,8	1,297	2053,86	45,8938	2054,37
0,81	2683,60	637,54	2758,29	1,383	2134,71	409,96	2173,72	1,321	2045,98	42,6671	2046,42
0,81	2683,16	668,09	2765,08	1,416	2138,67	386,67	2173,34	1,344	2053,95	57,376	2054,75
0,83	2673,07	619,36	2743,89	1,431	2125,44	389,34	2160,81	1,349	2067,68	105,003	2070,34
0,84	2672,82	627,15	2745,41	1,456	2138,68	392,52	2174,4	1,369	2057,73	48,4009	2058,3
0,85	2679,43	646,70	2756,37	1,473	2125,68	323,22	2150,11	1,394	2069,06	72,693	2070,34
0,86	2679,53	622,72	2750,94	1,495	2150,81	409,05	2189,36	1,403	2079,25	97,8291	2081,55
0,88	2677,52	669,60	2759,98	1,526	2140,23	394,17	2176,22	1,436	2066,79	88,1827	2068,67
0,89	2687,18	627,84	2759,55	1,535	2149,35	407,95	2187,72	1,447	2068,96	12,8442	2069
0,90	2687,07	640,35	2762,32	1,565	2138,63	412,21	2177,99	1,459	2056,34	43,1246	2056,79
0,91	2693,96	670,24	2776,08	1,573	2149,21	411,21	2188,19	1,480	2061,47	60,2634	2062,35
0,92	2690,11	625,34	2761,84	1,612	2144,02	428,33	2186,39	1,497	2063,9	57,8759	2064,71
0,94	2690,98	662,62	2771,36	1,648	2142,52	412,46	2181,86	1,502	2072,77	105,693	2075,46
0,95	2682,91	637,86	2757,69	1,662	2134,79	341,21	2161,89	1,523	2067,46	82,3859	2069,1
0,96	2685,49	663,60	2766,26	1,678	2151,07	387,45	2185,68	1,548	2048,65	62,2316	2049,59
0,98	2682,90	637,70	2757,65	1,701	2143,42	371,59	2175,39	1,557	2074,41	97,6933	2076,71
0,98	2693,03	616,19	2762,62	1,712	2149,13	380,18	2182,5	1,592	2063,13	108,361	2065,97
1,00	2696,75	639,47	2771,53	1,749	2142,59	382,60	2176,48	1,603	2063,22	37,9416	2063,57
1,01	2690,32	648,98	2767,49	1,753	2156,28	412,40	2195,36	1,614	2050,74	52,5891	2051,41
1,02	2690,71	673,54	2773,73	1,793	2147,52	391,23	2182,87	1,636	2052,23	49,5833	2052,83
1,04	2700,11	658,82	2779,32	1,798	2147,24	386,42	2181,73	1,646	2079,93	6,23936	2079,94

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,04	2697,87	655,33	2776,32	1,832	2148,86	403,13	2186,35	1,675	2064,16	77,0897	2065,6
1,06	2699,01	641,38	2774,17	1,836	2157,24	409,90	2195,84	1,696	2079,35	13,0707	2079,39
1,07	2702,71	626,32	2774,33	1,871	2152,15	416,34	2192,05	1,701	2068,09	8,38188	2068,11
1,08	2694,35	653,56	2772,48	1,878	2139,78	326,26	2164,51	1,741	2071,66	117	2074,96
1,10	2703,94	657,71	2782,78	1,917	2160,47	408,58	2198,76	1,746	2079,75	100,342	2082,17
1,10	2709,51	684,56	2794,65	1,922	2159,80	417,89	2199,86	1,785	2061,07	1,11655	2061,07
1,12	2695,50	681,70	2780,37	1,954	2152,78	394,49	2188,63	1,827	2056,86	81,1528	2058,46
1,13	2712,17	595,15	2776,70	1,962	2159,88	415,59	2199,5	1,833	2067,55	25,434	2067,71
1,14	2699,76	647,78	2776,39	1,994	2150,53	416,07	2190,41	1,850	2060,27	56,8332	2061,05
1,15	2726,24	629,89	2798,06	1,999	2150,04	421,66	2191	1,874	2065,17	67,402	2066,27
1,16	2714,03	622,17	2784,43	2,035	2146,72	403,55	2184,32	1,883	2072,18	36,7971	2072,51
1,18	2704,19	689,19	2790,63	2,039	2160,04	404,70	2197,62	1,911	2071,58	105,05	2074,24
1,18	2713,28	684,11	2798,19	2,061	2156,43	387,44	2190,96	1,923	2071,42	33,1701	2071,69
1,19	2704,04	647,03	2780,37	2,081	2162,43	363,33	2192,74	1,955	2071,88	95,2965	2074,07
1,20	2702,64	616,24	2772,01	2,102	2145,63	404,63	2183,45	1,965	2076,47	26,9199	2076,64
1,21	2707,44	662,23	2787,25	2,125	2159,31	396,49	2195,41	1,980	2050,66	64,0104	2051,66
1,23	2700,96	635,61	2774,74	2,147	2141,99	331,18	2167,44	2,008	2063,47	50,0811	2064,08
1,25	2705,88	624,17	2776,94	2,165	2161,53	430,04	2203,89	2,016	2070	77,7529	2071,46
1,26	2726,67	692,50	2813,23	2,185	2147,73	396,18	2183,96	2,045	2074,27	95,1093	2076,45
1,27	2706,42	652,98	2784,08	2,205	2156,92	421,78	2197,77	2,053	2070,32	112,131	2073,35
1,28	2710,58	646,80	2786,68	2,220	2149,79	391,90	2185,22	2,090	2070,07	88,4174	2071,96
1,29	2707,58	665,37	2788,14	2,238	2156,63	421,48	2197,43	2,133	2069,82	75,4474	2071,19
1,31	2711,60	661,75	2791,18	2,261	2161,32	433,51	2204,37	2,176	2069,95	11,3991	2069,98
1,31	2715,92	673,11	2798,09	2,277	2163,89	353,86	2192,63	2,182	2060,81	20,0174	2060,91

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,33	2698,30	624,93	2769,72	2,299	2167,30	429,44	2209,44	2,200	2068,09	57,2953	2068,88
1,34	2722,52	626,28	2793,63	2,314	2159,37	356,91	2188,67	2,224	2084,64	74,1528	2085,96
1,35	2723,99	636,10	2797,27	2,339	2162,25	424,14	2203,46	2,234	2057,87	8,634	2057,89
1,36	2710,59	642,62	2785,72	2,353	2153,12	422,96	2194,27	2,242	2059,77	34,7562	2060,06
1,37	2720,64	638,93	2794,66	2,376	2150,63	408,89	2189,16	2,282	2074,97	81,2381	2076,56
1,38	2720,84	659,04	2799,52	2,399	2148,42	382,87	2182,27	2,320	2073,27	110,439	2076,21
1,39	2734,34	644,68	2809,31	2,413	2136,97	413,49	2176,61	2,324	2082,17	91,6573	2084,19
1,40	2710,16	666,54	2790,92	2,443	2165,85	417,33	2205,69	2,352	2073,77	82,4518	2075,41
1,42	2718,50	660,46	2797,58	2,447	2151,60	412,65	2190,81	2,366	2071,13	36,0237	2071,44
1,42	2718,05	675,40	2800,71	2,487	2159,11	299,89	2179,84	2,371	2051,02	34,8822	2051,32
1,44	2714,10	660,71	2793,36	2,523	2151,42	389,44	2186,38	2,403	2071,1	95,9798	2073,32
1,44	2710,72	673,40	2793,11	2,535	2152,30	377,93	2185,23	2,407	2069,74	106,192	2072,46
1,46	2707,82	636,75	2781,68	2,556	2149,67	373,70	2181,91	2,444	2071,29	92,3332	2073,35
1,47	2719,85	652,92	2797,12	2,565	2158,72	356,80	2188,01	2,449	2075,45	89,9672	2077,4
1,47	2715,65	678,70	2799,18	2,595	2145,44	416,25	2185,45	2,485	2068,47	93,5148	2070,58
1,49	2719,01	662,76	2798,62	2,607	2155,05	398,81	2191,64	2,526	2068,65	24,4485	2068,79
1,49	2716,55	669,64	2797,87	2,632	2161,93	393,27	2197,41	2,530	2071,21	7,23489	2071,22
1,51	2721,72	671,54	2803,34	2,644	2162,18	346,28	2189,73	2,568	2067,99	89,7483	2069,94
1,52	2736,97	682,42	2820,76	2,674	2141,76	424,83	2183,49	2,594	2057,18	59,2537	2058,03
1,53	2717,44	642,80	2792,43	2,687	2168,47	415,28	2207,88	2,616	2057,41	55,8211	2058,17
1,55	2727,40	653,99	2804,71	2,716	2161,76	423,55	2202,86	2,621	2078	78,1151	2079,47
1,55	2724,20	676,28	2806,89	2,725	2165,16	409,19	2203,49	2,658	2066,35	70,4687	2067,55
1,57	2718,62	644,88	2794,06	2,759	2153,26	407,88	2191,55	2,667	2079,08	88,107	2080,95
1,58	2720,97	664,82	2801,01	2,764	2159,71	398,40	2196,15	2,696	2067,15	84,2051	2068,86

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,61	2716,71	682,17	2801,05	2,801	2150,20	408,02	2188,57	2,704	2081,93	100,283	2084,34
1,63	2721,83	682,68	2806,14	2,809	2168,63	423,77	2209,65	2,733	2069,1	97,164	2071,38
1,64	2726,62	686,43	2811,70	2,836	2157,64	410,07	2196,26	2,742	2084,48	35,7938	2084,79
1,66	2713,41	678,74	2797,01	2,845	2164,10	385,45	2198,16	2,769	2050,76	11,5579	2050,79
1,66	2730,86	669,32	2811,69	2,870	2162,80	412,60	2201,8	2,782	2079,6	94,718	2081,76

Г2. Числові значення силових параметрів різання при обробленні деталі зі сталі 45.

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,013	2439,82	440,456	2479,26	0,008	634,432	1,30426	634,433	0,007	617,918	19,5568	618,227
0,021	2481,79	497,424	2531,15	0,021	1098,33	2,54942	1098,33	0,018	960,629	74,1233	963,484
0,030	2513,97	553,298	2574,14	0,024	1165,32	2,51618	1165,32	0,032	1179,18	132,573	1186,61
0,034	2509,53	564,24	2572,18	0,043	1404,04	32,498	1404,42	0,049	1297,03	171,385	1308,3
0,054	2516,75	582,647	2583,31	0,067	1586,72	30,1299	1587,01	0,058	1346,24	206,988	1362,06
0,057	2516,33	592,955	2585,25	0,068	1610,22	57,698	1611,25	0,092	1428,56	241,705	1448,86
0,073	2533,6	582,918	2599,79	0,099	1765,39	53,9814	1766,22	0,116	1462,24	246,409	1482,86
0,079	2542,56	556,701	2602,79	0,106	1788,82	31,2083	1789,09	0,123	1477,17	249,162	1498,04

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,098	2534,7	570,151	2598,03	0,133	1852,79	32,7517	1853,08	0,163	1521,48	259,716	1543,49
0,106	2544,79	589,985	2612,29	0,144	1871,51	56,9307	1872,38	0,176	1530,63	232,401	1548,17
0,114	2538,31	554,836	2598,24	0,169	1907,59	8,68528	1907,61	0,204	1561,86	242,066	1580,51
0,129	2544,3	582,534	2610,14	0,192	1914,5	50,2133	1915,16	0,234	1588,58	268,21	1611,06
0,136	2537,24	558,731	2598,03	0,208	1943,8	56,0511	1944,61	0,255	1610,11	272,87	1633,07
0,152	2555,39	558,321	2615,67	0,237	1957,48	58,4473	1958,35	0,287	1622,82	249,233	1641,85
0,161	2551,92	573,166	2615,5	0,250	1972,96	67,9519	1974,13	0,307	1648,03	278,26	1671,36
0,178	2544,61	560,227	2605,55	0,280	1976,11	88,8423	1978,11	0,346	1662,46	252,342	1681,5
0,181	2534,76	598,158	2604,38	0,285	1985,38	82,4319	1987,09	0,356	1679,17	279,713	1702,31
0,195	2541,68	576,436	2606,23	0,317	1981,8	82,9585	1983,54	0,396	1693,02	231,203	1708,73
0,208	2541,48	554,751	2601,32	0,328	1998,75	109,783	2001,76	0,408	1709,23	283,692	1732,61
0,212	2540,15	557,515	2600,61	0,343	1995,12	49,807	1995,74	0,450	1711,86	251,847	1730,29
0,229	2532,43	552,653	2592,03	0,368	1992,9	50,6499	1993,54	0,456	1728,56	256,794	1747,53
0,232	2500,62	551,389	2560,69	0,384	1995,57	100,806	1998,11	0,479	1733,32	278,065	1755,48
0,249	2523,76	549,355	2582,86	0,407	1995,43	59,9478	1996,33	0,509	1744,81	284,788	1767,9
0,252	2536,16	596,764	2605,42	0,417	2014,07	57,984	2014,9	0,521	1755,79	262,928	1775,37

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,269	2511,66	574,568	2576,54	0,427	1999,35	44,1208	1999,84	0,540	1759,29	285,279	1782,27
0,278	2534,33	531,833	2589,53	0,457	2025,77	63,108	2026,75	0,573	1768,33	277,013	1789,9
0,284	2526,99	568,866	2590,23	0,464	2028,82	71,5783	2030,08	0,585	1781,18	267,355	1801,13
0,303	2500,56	560,722	2562,66	0,486	1990,93	61,674	1991,89	0,605	1775,44	279,858	1797,36
0,308	2498	568,582	2561,89	0,503	1997,5	19,8358	1997,6	0,644	1800,71	291,176	1824,1
0,325	2528,23	539,466	2585,14	0,509	2013,22	37,8727	2013,58	0,650	1795,3	250,786	1812,73
0,347	2502,18	553,454	2562,66	0,529	1990,97	40,0947	1991,37	0,677	1802,77	277,096	1823,94
0,348	2528,62	591,818	2596,95	0,552	2021,95	61,276	2022,88	0,706	1805,99	277,718	1827,22
0,367	2519,89	576,437	2584,98	0,579	2002,38	73,3683	2003,72	0,717	1818,93	259,693	1837,37
0,373	2541,4	586,023	2608,09	0,594	2028,6	58,342	2029,44	0,758	1811,27	244,226	1827,66
0,385	2530,82	556,841	2591,36	0,611	2019,53	94,4409	2021,74	0,770	1838,14	273,466	1858,37
0,399	2536,7	560,765	2597,94	0,632	2000,92	26,7458	2001,1	0,787	1823,29	270,137	1843,19
0,404	2517,57	574,104	2582,2	0,638	2024,4	125,175	2028,27	0,810	1823,31	264,876	1842,45
0,423	2531,79	565,9	2594,26	0,653	2025,87	41,5216	2026,3	0,827	1838,3	264,596	1857,24
0,426	2539,01	597,215	2608,3	0,674	2027,35	52,4945	2028,03	0,860	1825,87	243,903	1842,09
0,443	2511,36	556,343	2572,25	0,686	2046,03	48,1633	2046,6	0,877	1863,57	280,682	1884,59

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,456	2530,05	555,539	2590,32	0,692	2042,09	62,236	2043,04	0,893	1861,8	284,69	1883,44
0,464	2515,69	577,953	2581,23	0,712	2040,36	32,7358	2040,62	0,924	1832,15	262,821	1850,9
0,477	2533,22	540,369	2590,21	0,717	2025,73	29,1809	2025,94	0,937	1850,06	250,98	1867,01
0,482	2530,62	556,614	2591,11	0,736	2031,31	73,8834	2032,65	0,951	1852,27	273,518	1872,36
0,499	2540,52	586,859	2607,42	0,759	2055,48	43,8963	2055,95	0,977	1861,28	276,723	1881,74
0,506	2546,52	623,651	2621,78	0,777	2026,78	102,238	2029,36	1,000	1871,86	276,621	1892,19
0,516	2533,88	551,028	2593,1	0,804	2041,44	61,9553	2042,38	1,021	1859,18	247,774	1875,62
0,533	2532,58	547,941	2591,18	0,825	2034,88	24,8275	2035,03	1,044	1863,5	276,504	1883,9
0,539	2545,1	579,056	2610,14	0,845	2040,13	7,10256	2040,14	1,056	1865,8	260,226	1883,86
0,551	2516,72	564,672	2579,29	0,850	2041,94	93,9081	2044,1	1,069	1861,94	267,753	1881,09
0,568	2539,01	562,504	2600,57	0,868	2034,4	64,9762	2035,44	1,113	1868,94	238,492	1884,1
0,574	2513,87	560,358	2575,57	0,888	2023,42	32,1632	2023,68	1,118	1859,32	234,943	1874,1
0,592	2529,19	528,946	2583,91	0,892	2044,62	5,64965	2044,63	1,149	1876,1	264,416	1894,64
0,595	2527,67	542,614	2585,26	0,916	2047,63	55,5118	2048,38	1,173	1884,6	257,855	1902,16
0,612	2513,87	569,774	2577,63	0,927	2029,99	55,5742	2030,75	1,208	1882,31	224,586	1895,66
0,615	2507,6	575,688	2572,83	0,933	2011,68	51,8777	2012,35	1,221	1886,99	252,166	1903,76

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,635	2507,48	555,535	2568,28	0,959	2013,93	45,1309	2014,44	1,234	1887,97	267,62	1906,84
0,638	2525,62	572,504	2589,69	0,970	2057,05	35,9459	2057,36	1,263	1889,63	277,699	1909,93
0,655	2506,51	557,302	2567,72	1,001	2025,12	13,0937	2025,16	1,280	1914,78	271,681	1933,96
0,666	2531,68	518,064	2584,14	1,019	2031	3,47984	2031	1,308	1895,48	240,9	1910,73
0,672	2507,38	559,671	2569,08	1,024	2032,31	11,5716	2032,34	1,329	1916,86	265,608	1935,17
0,686	2519,85	513,965	2571,73	1,048	2034,43	23,6078	2034,57	1,358	1902,78	236,525	1917,42
0,696	2528,6	520,703	2581,66	1,058	2036,3	95,8324	2038,55	1,380	1911,97	251,235	1928,41
0,708	2489,87	535,425	2546,79	1,076	2033	74,6983	2034,37	1,399	1907,07	263,129	1925,14
0,725	2504,5	545,443	2563,21	1,097	2016,72	54,8513	2017,47	1,424	1914,71	271,134	1933,81
0,730	2493,15	559,501	2555,16	1,102	2039,22	53,3091	2039,92	1,442	1918,26	255,062	1935,14
0,747	2504,18	533,404	2560,36	1,119	2031,54	45,5821	2032,05	1,448	1908,61	257,225	1925,87
0,753	2509,92	558,568	2571,32	1,144	2034,48	36,998	2034,82	1,491	1916,4	231,552	1930,34
0,768	2507,86	518,132	2560,82	1,148	2041,14	90,1328	2043,13	1,496	1906,14	227,631	1919,68
0,774	2509,85	582,55	2576,57	1,187	2023,87	6,91271	2023,88	1,530	1919,06	278,726	1939,2
0,783	2489,75	514,718	2542,4	1,192	2028,88	104,875	2031,59	1,543	1940,47	263,647	1958,3
0,797	2515,07	511,963	2566,65	1,207	2027,78	31,7551	2028,03	1,576	1920,85	236,092	1935,3

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,800	2492,25	542,241	2550,56	1,230	2025,35	34,0665	2025,64	1,592	1945,26	279,795	1965,28
0,815	2494,23	496,04	2543,08	1,236	2036,98	102,178	2039,54	1,623	1938,35	210,972	1949,8
0,820	2500,42	504,071	2550,72	1,252	2014,1	41,7557	2014,53	1,633	1955,46	269,396	1973,93
0,833	2485,87	547,535	2545,46	1,279	2017,14	57,4456	2017,96	1,675	1937,64	227,056	1950,9
0,842	2506,31	545,767	2565,04	1,284	2049,92	90,0828	2051,9	1,681	1946,38	269,143	1964,9
0,848	2502,43	537,11	2559,42	1,319	2023,21	78,8795	2024,75	1,720	1944,74	212,404	1956,3
0,863	2489,69	540,981	2547,79	1,325	2042,38	98,5423	2044,76	1,729	1955,74	261,839	1973,19
0,866	2505,78	573,086	2570,48	1,347	2017,03	57,3476	2017,85	1,770	1938,27	236,269	1952,62
0,881	2478,5	538,64	2536,35	1,369	2014,52	57,1983	2015,33	1,775	1956,13	269,852	1974,66
0,893	2497,08	532,038	2553,13	1,390	2024,64	36,1946	2024,96	1,818	1942,95	223,546	1955,77
0,901	2487,95	569,857	2552,38	1,417	2027,25	46,8789	2027,79	1,823	1958,22	264,194	1975,96
0,916	2503,21	491,667	2551,04	1,422	2034,17	96,2321	2036,44	1,866	1947,08	235,028	1961,21
0,922	2501,3	518,982	2554,57	1,441	2022,84	38,4257	2023,2	1,871	1963,04	255,759	1979,63
0,939	2505,52	520,049	2558,92	1,462	2035,28	62,6088	2036,24	1,918	1958,06	233,913	1971,98
0,942	2509,27	576,697	2574,69	1,479	2016,91	91,8638	2019	1,927	1952,75	239,997	1967,44
0,953	2489,52	515,976	2542,43	1,502	2032,04	32,8343	2032,31	1,960	1967,02	263,803	1984,63

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,969	2483,44	531,412	2539,66	1,529	2018,81	61,6496	2019,75	1,981	1958,12	229,2	1971,49
0,972	2496,48	549,537	2556,25	1,541	2039,28	15,5911	2039,34	2,006	1974,38	259,585	1991,37
0,988	2494,36	526,868	2549,4	1,571	2028,86	0,31457	2028,86	2,037	1959,56	232,023	1973,25
0,993	2506,34	585,638	2573,85	1,581	2030,11	118,167	2033,55	2,052	1974,66	242,656	1989,51
1,008	2483,17	559,635	2545,45	1,591	2015,97	44,0957	2016,45	2,079	1976,03	280,948	1995,9
1,017	2506,57	571,765	2570,95	1,611	2024,82	30,1256	2025,04	2,104	1987,16	268,303	2005,19
1,029	2486,18	522,816	2540,56	1,625	2005,73	42,0762	2006,17	2,124	1966,2	213,989	1977,81
1,047	2483,28	526,346	2538,45	1,629	2024,84	41,3772	2025,26	2,156	1988,9	271,434	2007,34
1,066	2498,33	520,278	2551,93	1,669	2009,83	70,3921	2011,06	2,170	1969,87	224,795	1982,65
1,072	2500,29	510,87	2551,95	1,674	2034	100,427	2036,48	2,202	1993,86	272,835	2012,44
1,089	2472,63	541,176	2531,16	1,690	2016,37	43,3371	2016,84	2,221	1978,88	228,988	1992,08
1,095	2499,54	566,712	2562,98	1,714	2021,13	64,8482	2022,17	2,250	2001,66	262,393	2018,78
1,107	2498,1	523,46	2552,35	1,730	1999,39	65,5273	2000,46	2,277	1981,09	235,913	1995,09
1,119	2495,1	544,107	2553,74	1,754	2030,45	62,2822	2031,41	2,297	1996,69	237,86	2010,81
1,130	2477,89	530,506	2534,04	1,771	2005,96	74,5825	2007,35	2,329	1991,14	228,168	2004,17
1,146	2497,15	518,575	2550,43	1,802	1996,26	48,0967	1996,84	2,344	2005,66	269,566	2023,69

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,162	2496,22	520,767	2549,96	1,841	1995,82	83,2615	1997,56	2,376	1980,75	220,46	1992,98
1,174	2504,06	507,896	2555,05	1,865	2020,35	46,7212	2020,89	2,386	2009,11	272,877	2027,56
1,181	2499,79	535,337	2556,47	1,876	2015,88	38,9762	2016,26	2,418	2000,74	241,693	2015,29
1,198	2493,9	513,79	2546,28	1,895	2033,98	56,219	2034,76	2,432	2004,98	242,635	2019,61
1,201	2498,89	584,303	2566,29	1,909	2023,54	94,8096	2025,76	2,471	1989,92	225,884	2002,7
1,214	2496,18	512,514	2548,25	1,929	2014,1	75,8815	2015,53	2,482	2005,54	242,928	2020,2
1,225	2483,4	503,938	2534,01	1,943	2029,81	13,3157	2029,85	2,517	1996,77	232,183	2010,22
1,234	2497,73	516,895	2550,65	1,966	2006,02	85,2043	2007,83	2,530	2012,57	259,938	2029,29
1,243	2507,86	505,11	2558,22	1,978	2022,01	32,7004	2022,27	2,558	2011,78	268,303	2029,59
1,251	2486,38	530,273	2542,3	2,004	1998,22	82,3112	1999,91	2,577	2016,42	272,13	2034,7
1,267	2508,31	547,046	2567,27	2,015	2026,86	15,0518	2026,92	2,609	1994,78	235,409	2008,62
1,273	2498,94	536,627	2555,91	2,026	2028	52,0707	2028,67	2,624	2007,35	269,581	2025,37
1,288	2501,25	528,221	2556,42	2,054	2020,8	65,1706	2021,85	2,644	2004,57	266,826	2022,25
1,294	2505,28	503,03	2555,28	2,062	2016,73	69,6235	2017,93	2,677	2011,18	275,331	2029,94
1,308	2496,83	530,555	2552,58	2,096	2028,57	50,7894	2029,21	2,696	1998,09	234,4	2011,79
1,317	2486,45	511,17	2538,45	2,101	2011,47	71,6755	2012,75	2,727	2009,22	265,067	2026,63

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,326	2490,6	502,151	2540,72	2,135	2028,24	52,5717	2028,92	2,746	1998,59	231,072	2011,9
1,337	2487,43	511,547	2539,49	2,144	2011,34	71,7315	2012,62	2,773	2008,42	258,976	2025,05
1,346	2476,07	540,88	2534,46	2,176	2023,14	69,129	2024,32	2,792	1995,36	218,321	2007,27
1,354	2482,63	486,507	2529,85	2,188	2005,4	0,56238	2005,4	2,821	2022,48	275,046	2041,1
1,361	2502,89	508,678	2554,06	2,214	2038,73	51,5694	2039,38	2,826	2022,26	272,892	2040,59
1,380	2510,5	547,754	2569,56	2,227	2013,76	96,1727	2016,06	2,869	2005,75	231,229	2019,03
1,383	2504,46	531,314	2560,2	2,252	2016,63	47,5144	2017,19	2,874	1997,28	229,355	2010,41
1,401	2507,62	554,475	2568,19	2,256	2025,02	87,6457	2026,92	2,913	2006,98	212,863	2018,24
1,406	2494,61	569,888	2558,88	2,289	2011,42	97,0702	2013,76	2,917	1997,67	227,045	2010,53
1,420	2498,84	532,209	2554,89	2,298	2024,99	90,4828	2027,01	2,965	1991,46	209,896	2002,49
1,429	2496,61	556,263	2557,83	2,336	2013,71	2,29784	2013,71	3,014	2017,75	260,009	2034,43
1,446	2466,55	522,446	2521,27	2,366	2012,67	69,14	2013,86	3,029	2006,08	264,434	2023,43
1,455	2504,57	489,11	2551,88	2,374	2033,96	28,7288	2034,16	3,064	2012,06	256,864	2028,39
1,467	2469,37	550,513	2529,99	2,401	2006,07	99,5144	2008,54	3,087	2006,65	250,995	2022,29
1,475	2497,7	500,686	2547,39	2,417	2020,6	46,9668	2021,15	3,111	2016,19	257,234	2032,53
1,488	2491,61	532,976	2547,98	2,423	2019,21	60,8269	2020,13	3,131	2014,72	224,538	2027,19

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,501	2511,89	537,45	2568,74	2,451	2015,12	93,3395	2017,28	3,159	2007,52	257,953	2024,02
1,510	2473,88	555,01	2535,37	2,460	2006,43	114,431	2009,69	3,170	2005,08	266,506	2022,71
1,528	2491,85	534,051	2548,44	2,493	2014,96	65,3844	2016,02	3,205	2023,49	276,634	2042,31
1,531	2486,58	516,579	2539,67	2,498	2012,25	71,6805	2013,53	3,230	2017	260,771	2033,79
1,546	2500,17	514,58	2552,58	2,533	2023,07	60,753	2023,98	3,251	2014,83	270,19	2032,87
1,553	2470,57	542,609	2529,45	2,536	2006,33	75,6618	2007,76	3,279	1998,66	224,994	2011,28
1,572	2500,34	540,874	2558,17	2,571	2002,45	71,0369	2003,71	3,301	2021,35	258,992	2037,87
1,577	2472,47	547,76	2532,42	2,608	2005,37	75,5861	2006,79	3,331	2000,22	228,289	2013,21
1,596	2491,41	517,893	2544,67	2,631	2028,67	33,9423	2028,95	3,341	2022,22	263,522	2039,32
1,599	2494,28	556,603	2555,63	2,651	2008,34	63,8586	2009,35	3,362	2021,24	265,317	2038,58
1,617	2476,44	548,703	2536,5	2,656	2009,39	47,3769	2009,95	3,384	2016,82	254,215	2032,78
1,623	2508,62	488,962	2555,83	2,679	2009,17	42,4834	2009,62	3,399	2019,26	255,34	2035,34
1,635	2504,32	527,576	2559,29	2,691	2016,48	35,7499	2016,8	3,433	2020,42	259,8	2037,05
1,648	2503,34	519,787	2556,73	2,719	2000,42	96,0691	2002,73	3,452	2016,72	256,437	2032,96
1,651	2500,54	517,371	2553,5	2,726	2026,93	58,09	2027,76	3,480	2024,27	263,731	2041,38
1,672	2492,41	539,901	2550,22	2,757	2016,89	56,9948	2017,7	3,514	2017,01	261,694	2033,92

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,675	2499,98	559,63	2561,85	2,763	2022,84	115,347	2026,13	3,519	2025,61	278,084	2044,61
1,689	2498,95	527,693	2554,06	2,784	2003,66	71,9191	2004,95	3,568	2005,52	244,299	2020,34
1,698	2486,81	510,245	2538,62	2,804	2023,8	54,5827	2024,54	3,605	2022,34	276,636	2041,17
1,709	2475,19	527,652	2530,81	2,830	2011,79	79,9156	2013,38	3,616	2031,24	273,488	2049,57
1,726	2496,47	522,111	2550,48	2,853	2014,86	57,6859	2015,69	3,656	2003,99	222,638	2016,32
1,746	2495,22	529,451	2550,77	2,857	2027,72	41,766	2028,15	3,662	2029,37	273,27	2047,69
1,748	2472,98	539,372	2531,12	2,884	2002,8	52,7551	2003,49	3,694	2014,74	209,607	2025,61
1,767	2486,17	506,117	2537,16	2,891	2027,61	74,8164	2028,99	3,705	2032,92	264,186	2050,01
1,773	2498,54	551,899	2558,77	2,915	2017,19	35,5661	2017,5	3,735	2010,96	226,092	2023,63
1,788	2495,12	533,79	2551,58	2,930	2024,92	18,6131	2025,01	3,755	2019,78	248,201	2034,97
1,796	2505,52	516,005	2558,1	2,949	2004,93	71,6094	2006,21	3,770	2019,8	271,578	2037,98
1,809	2471,62	542,385	2530,43	2,970	2013,55	34,6352	2013,85	3,804	2034,82	280,72	2054,09
1,824	2507,26	554,064	2567,75	2,974	2014,89	49,8959	2015,51	3,826	2018,85	250,526	2034,33
1,828	2493,06	534,564	2549,73	2,999	2010,68	77,826	2012,19	3,843	2031,68	271,439	2049,73

Г3. Числові значення силових параметрів різання при обробленні деталі зі сталі 34Х2НМ.

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,016	2506,11	420,793	2541,19	0,006	933,145	17,7326	933,313	0,009	737,054	4,11954	737,066
0,032	2635,01	519,087	2685,65	0,016	1449,94	114,031	1454,42	0,022	1193,75	12,1435	1193,81
0,035	2672,15	597,346	2738,1	0,029	1781,89	202,781	1793,39	0,030	1326,75	29,7882	1327,08
0,060	2745,83	606,931	2812,11	0,039	1917,73	249,101	1933,84	0,044	1511,3	46,342	1512,01
0,063	2759,47	629,662	2830,4	0,053	2035,24	313,427	2059,23	0,069	1734,64	50,0653	1735,36
0,086	2800,35	632,577	2870,91	0,065	2087,05	321,292	2111,64	0,079	1791,46	47,5591	1792,09
0,089	2810,42	643,815	2883,22	0,084	2157,28	357,012	2186,62	0,097	1894,65	42,7951	1895,13
0,106	2825,32	616,898	2891,88	0,104	2201,27	372,575	2232,58	0,120	1991,12	12,6774	1991,16
0,117	2845,68	664,692	2922,28	0,115	2223,32	393,565	2257,89	0,125	2003,13	56,0304	2003,91
0,135	2849,41	666,271	2926,27	0,130	2243,04	403,955	2279,12	0,165	2087,27	34,7031	2087,56
0,145	2879,74	687,19	2960,6	0,157	2278,34	420,156	2316,76	0,204	2133,97	54,2906	2134,66
0,157	2868,25	649,331	2940,83	0,190	2282,1	356,848	2309,83	0,246	2198,42	55,7078	2199,13
0,176	2898,63	654,878	2971,69	0,195	2308,48	435,581	2349,21	0,254	2201,68	48,6796	2202,22
0,184	2897,88	572,655	2953,92	0,226	2319,18	421,46	2357,16	0,286	2226,33	23,838	2226,46
0,200	2909,26	662,845	2983,82	0,237	2328,99	404,185	2363,8	0,295	2235,99	50,1215	2236,55
0,203	2931,31	689,83	3011,39	0,269	2349,21	432,493	2388,69	0,320	2248,85	31,2141	2249,07
0,216	2931,57	654,666	3003,78	0,309	2345,67	437,523	2386,13	0,325	2269,73	102,023	2272,02
0,235	2926,49	686,619	3005,96	0,314	2365,26	432,07	2404,4	0,362	2267,99	38,4751	2268,32
0,238	2950,88	720,422	3037,55	0,349	2342,24	328,575	2365,17	0,371	2289,96	93,2158	2291,86
0,251	2923,78	678,474	3001,47	0,359	2363,12	416,621	2399,56	0,400	2272,49	74,1794	2273,7
0,267	2919,81	648,823	2991,03	0,394	2351,92	426,351	2390,25	0,419	2289,65	42,7543	2290,05

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,281	2937,69	680,545	3015,49	0,404	2376,05	384,896	2407,02	0,433	2297,7	81,8155	2299,16
0,295	2951,59	628,327	3017,73	0,441	2356,33	420,19	2393,5	0,467	2295,97	68,5845	2296,99
0,302	2932,3	621,177	2997,37	0,447	2379,44	423,202	2416,78	0,471	2296,94	74,8696	2298,16
0,309	2934,76	663,142	3008,75	0,468	2354,28	370,643	2383,28	0,495	2289,51	42,6445	2289,91
0,327	2914,42	662,963	2988,87	0,496	2358,84	380,38	2389,31	0,513	2298,63	32,0732	2298,85
0,334	2947,8	679,785	3025,17	0,502	2366,35	404,876	2400,74	0,538	2288,46	48,7229	2288,98
0,345	2942,84	666,089	3017,28	0,531	2362,8	393,34	2395,32	0,558	2315,77	85,2977	2317,34
0,362	2938,42	622,978	3003,73	0,545	2372,08	412,226	2407,63	0,578	2297,61	53,1538	2298,22
0,365	2938,18	636,661	3006,37	0,570	2363,31	398,27	2396,63	0,601	2282,03	9,68447	2282,05
0,387	2919,33	647,309	2990,23	0,588	2358,69	349,113	2384,39	0,611	2319,56	77,5143	2320,85
0,394	2958,3	677,086	3034,8	0,602	2361,7	388,795	2393,49	0,637	2305,6	50,8239	2306,16
0,404	2927,15	623,631	2992,85	0,632	2378,72	407,661	2413,4	0,653	2324,5	54,8003	2325,15
0,427	2931,91	635,094	2999,91	0,637	2382,31	388,456	2413,77	0,681	2308,51	41,8401	2308,89
0,451	2924,36	625,192	2990,44	0,675	2365,58	390,063	2397,52	0,697	2325,88	16,9019	2325,94
0,457	2960,73	667,044	3034,94	0,685	2384,86	402,028	2418,51	0,720	2303,79	53,8995	2304,42
0,473	2937,79	641,614	3007,04	0,709	2372,74	389,685	2404,53	0,738	2302,42	18,185	2302,49
0,485	2948,53	622,122	3013,45	0,728	2386,18	398,738	2419,27	0,749	2324,15	21,9935	2324,25
0,494	2946,71	652,03	3017,99	0,752	2379,54	405,611	2413,86	0,760	2308,9	38,6323	2309,22
0,515	2944,66	643,064	3014,06	0,771	2377,68	358,593	2404,57	0,783	2311,99	22,9417	2312,1
0,534	2930,76	632,874	2998,31	0,791	2376,35	404,493	2410,53	0,802	2324,54	0,74113	2324,54
0,543	2965,57	578,101	3021,39	0,824	2374,67	366,267	2402,75	0,826	2317,48	63,8698	2318,36
0,558	2931,91	650,583	3003,22	0,829	2376,39	376,509	2406,03	0,849	2317,42	33,4841	2317,66
0,572	2940,22	614,105	3003,67	0,870	2374,6	386,564	2405,86	0,854	2333,83	36,8536	2334,12
0,580	2938,02	568,931	2992,6	0,901	2368,3	366,263	2396,45	0,878	2331,79	30,7233	2331,99

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,601	2949,54	625,313	3015,1	0,916	2397,8	375,756	2427,06	0,901	2328,41	11,8299	2328,44
0,606	2942,83	642,237	3012,1	0,939	2382,64	325,303	2404,74	0,915	2312,41	38,7434	2312,73
0,624	2955,38	587,157	3013,14	0,960	2400,8	403,634	2434,49	0,941	2310,88	17,3335	2310,95
0,627	2954,32	662,648	3027,72	0,984	2392,72	394,64	2425,05	0,946	2333,19	2,53619	2333,19
0,639	2959,65	614,995	3022,87	1,003	2391,87	349,774	2417,31	0,964	2325,42	26,1361	2325,57
0,658	2939,19	625,29	3004,97	1,028	2371,96	360,895	2399,26	0,987	2322,95	13,3663	2322,99
0,678	2945,25	643,146	3014,65	1,047	2389,27	359,318	2416,14	1,002	2322,22	9,20399	2322,24
0,688	2967,71	585,889	3024,99	1,067	2375,19	392,083	2407,33	1,017	2321,55	33,7173	2321,79
0,697	2948,52	622,971	3013,61	1,095	2386,8	393,753	2419,06	1,045	2317,01	0,9305	2317,01
0,720	2933,15	617,865	2997,52	1,132	2390,41	369,999	2418,88	1,050	2323,92	20,5588	2324,01
0,741	2933,67	629,323	3000,41	1,142	2403,23	389,599	2434,61	1,070	2327,89	22,1804	2328
0,747	2944,22	598,416	3004,42	1,174	2385,62	378,167	2415,41	1,091	2333,13	29,9039	2333,32
0,760	2929,48	635,953	2997,71	1,188	2392,45	368,091	2420,6	1,111	2333,83	36,8536	2334,12
0,770	2955,32	575,5	3010,83	1,211	2394,39	370,673	2422,91	1,131	2331,79	30,7233	2331,99
0,780	2932,4	622,966	2997,84	1,233	2393,31	396,196	2425,88	1,151	2328,41	11,8299	2328,44
0,797	2937,53	614,567	3001,13	1,263	2380,64	326,911	2402,98	1,171	2312,41	38,7434	2312,73
0,821	2934,53	620,666	2999,45	1,278	2404,78	341,264	2428,87	1,191	2310,88	17,3335	2310,95
0,825	2962,38	660,219	3035,06	1,298	2372,78	384,471	2403,73	1,211	2333,19	2,53619	2333,19
0,841	2930,69	619,917	2995,54	1,325	2383,55	371,734	2412,36	1,231	2325,42	26,1361	2325,57
0,853	2942,72	585,396	3000,38	1,338	2380,38	385,305	2411,36	1,251	2322,95	13,3663	2322,99
0,860	2928,31	607,614	2990,68	1,370	2387,88	379,352	2417,83	1,271	2322,22	9,20399	2322,24
0,879	2927,89	616,916	2992,18	1,387	2373,68	313,87	2394,34	1,291	2321,55	33,7173	2321,79
0,885	2954,42	648,63	3024,78	1,413	2395,87	371,844	2424,55	1,311	2317,01	0,9305	2317,01
0,901	2925,76	618,817	2990,49	1,422	2388,62	385,621	2419,55	1,331	2323,92	20,5588	2324,01

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,912	2941,38	586,589	2999,3	1,457	2375,73	378,858	2405,75	1,351	2327,89	22,1804	2328
0,920	2928,29	614,162	2992	1,497	2387,02	385,323	2417,92	1,371	2333,13	29,9039	2333,32
0,936	2936,59	620,117	3001,35	1,503	2396,37	369,765	2424,73	1,391	2333,83	36,8536	2334,12
0,941	2926,07	630,724	2993,28	1,536	2375,2	370,103	2403,86	1,411	2331,79	30,7233	2331,99
0,960	2938,69	614,04	3002,16	1,549	2394,99	383,104	2425,44	1,431	2328,41	11,8299	2328,44
0,965	2931,51	631,903	2998,84	1,574	2388,28	395,085	2420,74	1,451	2312,41	38,7434	2312,73
0,984	2926,28	608,747	2988,93	1,586	2381,22	326,413	2403,49	1,471	2310,88	17,3335	2310,95
0,987	2946,43	641,124	3015,38	1,614	2387,67	401,89	2421,26	1,491	2333,19	2,53619	2333,19
1,003	2931,78	606,54	2993,86	1,627	2395,85	337,275	2419,47	1,511	2325,42	26,1361	2325,57
1,016	2937,38	621,452	3002,4	1,654	2373,66	401,131	2407,32	1,531	2322,95	13,3663	2322,99
1,019	2935,57	636,879	3003,86	1,673	2396,78	358,407	2423,43	1,551	2322,22	9,20399	2322,24
1,041	2928,51	636,987	2996,99	1,692	2386,76	385,383	2417,67	1,571	2321,55	33,7173	2321,79
1,065	2927,97	627,524	2994,46	1,718	2394,02	360,271	2420,98	1,591	2317,01	0,9305	2317,01
1,067	2908,9	594,6	2969,05	1,749	2369,48	328,789	2392,18	1,611	2323,92	20,5588	2324,01
1,082	2924,89	605,339	2986,87	1,754	2393,74	392,069	2425,64	1,631	2327,89	22,1804	2328
1,092	2926,33	580,567	2983,36	1,788	2375,45	401,912	2409,21	1,651	2333,13	29,9039	2333,32
1,099	2923,32	616,847	2987,69	1,797	2391,28	402,626	2424,94	1,671	2312,41	38,7434	2312,73
1,121	2919,07	619,311	2984,04	1,823	2378,31	395,288	2410,94	1,691	2310,88	17,3335	2310,95
1,151	2954,32	568,931	3008,6	1,835	2391,63	384,884	2422,4	1,711	2333,19	2,53619	2333,19
1,181	2959,65	625,313	3024,99	1,864	2383,91	406,436	2418,31	1,731	2325,42	26,1361	2325,57
1,211	2939,19	642,237	3008,54	1,874	2399,26	378,793	2428,98	1,751	2322,95	13,3663	2322,99
1,241	2945,25	587,157	3003,21	1,906	2382,69	376,953	2412,32	1,771	2322,22	9,20399	2322,24
1,271	2967,71	662,648	3040,79	1,920	2387,7	399,661	2420,92	1,791	2321,55	33,7173	2321,79
1,301	2948,52	614,995	3011,97	1,943	2368,59	369,201	2397,19	1,811	2317,01	0,9305	2317,01

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,331	2933,15	625,29	2999,06	1,963	2384,74	343,852	2409,4	1,831	2323,92	20,5588	2324,01
1,361	2933,67	643,146	3003,34	1,987	2381,15	389,392	2412,78	1,851	2327,89	22,1804	2328
1,391	2944,22	585,889	3001,95	2,005	2387,54	400,418	2420,88	1,871	2333,13	29,9039	2333,32
1,421	2929,48	622,971	2994,99	2,031	2366,8	382,841	2397,56	1,891	2333,83	36,8536	2334,12
1,451	2955,32	617,865	3019,22	2,049	2404,87	325,697	2426,82	1,911	2331,79	30,7233	2331,99
1,481	2932,4	629,323	2999,17	2,078	2373,18	305,514	2392,76	1,931	2328,41	11,8299	2328,44
1,511	2937,53	598,416	2997,86	2,092	2402,84	397,7	2435,53	1,951	2312,41	38,7434	2312,73
1,541	2934,53	635,953	3002,65	2,121	2391,24	390,418	2422,9	1,971	2310,88	17,3335	2310,95
1,571	2962,38	575,5	3017,76	2,130	2401,41	387,101	2432,41	1,991	2333,19	2,53619	2333,19
1,601	2930,69	622,966	2996,17	2,163	2385,79	323,023	2407,56	2,011	2325,42	26,1361	2325,57
1,631	2942,72	614,567	3006,21	2,166	2400,33	323,448	2422,02	2,031	2322,95	13,3663	2322,99
1,661	2928,31	620,666	2993,36	2,203	2375,81	353,45	2401,96	2,051	2322,22	9,20399	2322,24
1,691	2927,89	660,219	3001,4	2,212	2373,73	373,444	2402,93	2,071	2321,55	33,7173	2321,79
1,721	2954,42	619,917	3018,76	2,240	2362,48	368,14	2390,99	2,091	2317,01	0,9305	2317,01
1,751	2925,76	585,396	2983,75	2,249	2395,29	323,51	2417,04	2,111	2323,92	20,5588	2324,01
1,781	2941,38	607,614	3003,48	2,279	2364,05	286,867	2381,39	2,131	2327,89	22,1804	2328
1,811	2928,29	616,916	2992,57	2,289	2392,49	340,309	2416,57	2,151	2333,13	29,9039	2333,32
1,841	2936,59	648,63	3007,37	2,321	2356,48	286,14	2373,79	2,171	2312,41	38,7434	2312,73
1,871	2926,07	618,817	2990,79	2,336	2396,52	401,997	2430	2,191	2310,88	17,3335	2310,95
1,901	2938,69	586,589	2996,66	2,364	2383,38	283,356	2400,16	2,211	2333,19	2,53619	2333,19
1,931	2931,51	614,162	2995,15	2,376	2384,38	342,516	2408,86	2,231	2325,42	26,1361	2325,57
1,961	2926,28	620,117	2991,26	2,398	2374,17	399,088	2407,48	2,251	2322,95	13,3663	2322,99
1,991	2946,43	630,724	3013,18	2,420	2394,71	360,801	2421,74	2,271	2322,22	9,20399	2322,24
2,021	2931,78	614,04	2995,39	2,439	2394,86	336,724	2418,42	2,291	2321,55	33,7173	2321,79

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
2,051	2937,38	648,63	3008,14	2,454	2394,43	353,739	2420,42	2,311	2317,01	0,9305	2317,01
2,081	2935,57	618,817	3000,08	2,475	2376,6	313,583	2397,2	2,331	2323,92	20,5588	2324,01
2,111	2928,51	586,589	2986,68	2,493	2392,29	411,026	2427,34	2,351	2327,89	22,1804	2328
2,141	2927,89	614,162	2991,61	2,516	2376,75	287,347	2394,06	2,371	2333,13	29,9039	2333,32
2,171	2954,42	620,117	3018,8	2,531	2393,95	371,867	2422,66	2,391	2333,83	36,8536	2334,12
2,201	2925,76	630,724	2992,97	2,563	2388,47	349,754	2413,94	2,411	2331,79	30,7233	2331,99
2,231	2941,38	614,04	3004,79	2,572	2387,11	330,539	2409,89	2,431	2328,41	11,8299	2328,44
2,261	2928,29	631,903	2995,69	2,604	2366,31	395,361	2399,11	2,451	2312,41	38,7434	2312,73
2,291	2936,59	608,747	2999,02	2,615	2398,98	385,308	2429,73	2,471	2310,88	17,3335	2310,95
2,321	2926,07	641,124	2995,48	2,649	2376,13	326,409	2398,44	2,491	2333,19	2,53619	2333,19
2,351	2938,69	606,54	3000,63	2,653	2393,8	392,239	2425,72	2,511	2325,42	26,1361	2325,57
2,381	2931,51	621,452	2996,66	2,695	2387,3	328,282	2409,77	2,531	2322,95	13,3663	2322,99
2,411	2926,28	636,879	2994,78	2,699	2363,37	310,511	2383,68	2,551	2322,22	9,20399	2322,24
2,441	2946,43	636,987	3014,5	2,740	2367,62	401,836	2401,48	2,571	2321,55	33,7173	2321,79
2,471	2931,78	627,524	2998,19	2,777	2368,38	287,742	2385,8	2,591	2317,01	0,9305	2317,01
2,501	2937,38	594,6	2996,96	2,786	2394,68	408,119	2429,21	2,611	2323,92	20,5588	2324,01
2,531	2935,57	605,339	2997,33	2,817	2372,79	393,428	2405,19	2,631	2327,89	22,1804	2328
2,561	2928,51	580,567	2985,5	2,832	2391,81	397,571	2424,63	2,651	2333,13	29,9039	2333,32
2,591	2927,97	616,847	2992,24	2,866	2358,17	307,868	2378,18	2,671	2312,41	38,7434	2312,73
2,621	2908,9	619,311	2974,1	2,876	2396,73	394,786	2429,03	2,691	2310,88	17,3335	2310,95
2,651	2924,89	568,931	2979,71	2,911	2350,56	284,584	2367,72	2,711	2333,19	2,53619	2333,19
2,681	2926,33	625,313	2992,39	2,920	2388,62	369,196	2416,98	2,731	2325,42	26,1361	2325,57
2,711	2923,32	642,237	2993,04	2,950	2365,04	313,013	2385,66	2,751	2322,95	13,3663	2322,99
2,741	2919,07	587,157	2977,54	2,959	2388,58	395,918	2421,17	2,771	2322,22	9,20399	2322,24

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
2,771	2954,32	662,648	3027,72	2,987	2370,05	386,445	2401,35	2,791	2321,55	33,7173	2321,79
2,801	2959,65	622,971	3024,5	3,004	2383,49	351,83	2409,32	2,811	2317,01	0,9305	2317,01
2,831	2939,19	617,865	3003,43	3,035	2375,99	344,951	2400,9	2,831	2323,92	20,5588	2324,01
2,861	2927,89	629,323	2994,76	3,048	2392,64	396,691	2425,3	2,851	2322,95	13,3663	2322,99
2,891	2954,42	598,416	3014,42	3,074	2377,05	380,99	2407,39	2,871	2322,22	9,20399	2322,24
2,921	2925,76	635,953	2994,08	3,090	2391,56	362,195	2418,83	2,891	2321,55	33,7173	2321,79
2,951	2941,38	575,5	2997,15	3,120	2372,9	336,408	2396,63	2,911	2317,01	0,9305	2317,01
2,981	2928,29	622,966	2993,82	3,129	2392,09	363,963	2419,62	2,931	2323,92	20,5588	2324,01
3,011	2936,59	614,567	3000,21	3,155	2393,48	393,677	2425,64	2,951	2327,89	22,1804	2328
3,041	2926,07	620,666	2991,17	3,173	2388,31	367,157	2416,37	2,971	2333,13	29,9039	2333,32
3,071	2938,69	660,219	3011,94	3,199	2363,69	318,212	2385,01	2,991	2333,83	36,8536	2334,12

Г4. Числові значення силових параметрів різання при обробленні деталі з сплаву АД33.

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0	0,000	0	0	0
0,018	932,087	139,545	942,475	0,007	371,141	9,91935	371,274	0,010	303,71	0,87586	303,711
0,044	1039,21	211,024	1060,42	0,017	568,342	40,8727	569,81	0,027	483,023	17,1487	483,327
0,048	1055,1	229,466	1079,76	0,031	697,486	76,7201	701,693	0,046	587,993	23,5133	588,463
0,065	1082,92	231,251	1107,34	0,055	794,496	115,934	802,91	0,049	603,778	30,6482	604,555
0,083	1108,75	240,283	1134,49	0,062	809,853	120,344	818,746	0,093	738,95	7,44795	738,988
0,107	1134,82	245,217	1161,01	0,091	860,523	137,248	871,399	0,134	800,651	4,04476	800,661
0,118	1148,03	245,79	1174,05	0,125	885,313	129,92	894,795	0,154	829,819	10,3041	829,883
0,128	1154,27	240,865	1179,13	0,129	889,131	135,424	899,385	0,179	851,638	3,80022	851,646
0,148	1171,14	244,125	1196,31	0,172	917,389	147,544	929,178	0,199	861,177	7,78599	861,212
0,152	1176,34	244,035	1201,39	0,184	928,105	157,566	941,385	0,227	881,705	2,34935	881,708
0,182	1187,26	227,851	1208,93	0,218	942,967	151,343	955,035	0,260	897,487	1,1325	897,488
0,185	1189,44	232,292	1211,91	0,247	953,373	146,414	964,55	0,275	910,915	13,2069	911,011
0,204	1204,84	239,983	1228,51	0,267	967,949	163,928	981,732	0,303	918,997	15,2195	919,123
0,220	1219,21	254,39	1245,47	0,290	973,516	165,229	987,438	0,320	924,17	2,18982	924,173
0,228	1217,64	257,403	1244,55	0,316	983,081	155,373	995,283	0,331	924,424	5,38187	924,44
0,251	1226,49	247,258	1251,17	0,341	986,77	162,449	1000,05	0,364	931,921	19,0166	932,115
0,259	1236,05	242,541	1259,62	0,369	994,257	163,135	1007,55	0,381	946,906	11,2372	946,973
0,270	1237,13	260,723	1264,3	0,388	989,988	139,319	999,743	0,398	944,96	6,76853	944,984
0,289	1241,4	263,945	1269,15	0,420	1006,33	161,987	1019,28	0,432	955,526	2,75688	955,53
0,297	1251,4	247,669	1275,67	0,434	1007,89	154,992	1019,74	0,451	955,034	5,05738	955,047

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,308	1249,78	256,181	1275,77	0,466	1001,61	159,76	1014,27	0,472	968,851	5,70155	968,868
0,326	1252,72	255,805	1278,57	0,478	1016,67	154,655	1028,37	0,487	974,364	16,5994	974,505
0,330	1264,32	257,735	1290,32	0,490	1011,03	150,369	1022,15	0,500	970,324	23,8081	970,616
0,341	1258,59	256,892	1284,54	0,516	1013,7	155,286	1025,52	0,528	968,909	13,9009	969,009
0,355	1261,82	256,162	1287,56	0,532	1013,09	135,849	1022,16	0,548	977,104	14,3586	977,209
0,365	1267,14	245,896	1290,78	0,562	1015,29	152,078	1026,62	0,554	975,307	13,9134	975,406
0,372	1257,2	245,244	1280,9	0,584	1021,29	143,729	1031,35	0,574	976,011	2,19745	976,013
0,392	1253,63	249,076	1278,13	0,601	1015,5	147,544	1026,16	0,601	984,674	9,70162	984,722
0,399	1265,87	237,541	1287,96	0,627	1009,79	139,135	1019,33	0,614	975,973	14,9409	976,087
0,406	1263,76	247,114	1287,69	0,645	1016,86	135,768	1025,88	0,620	975,407	10,2614	975,461
0,419	1256,19	239,277	1278,78	0,658	1016,77	149,322	1027,68	0,658	974,941	2,83128	974,945
0,434	1261,34	247,324	1285,36	0,691	1019,13	144,288	1029,29	0,674	988,339	0,81871	988,339
0,454	1263,8	249,729	1288,24	0,702	1027,43	143,491	1037,4	0,689	974,168	1,81028	974,17
0,475	1257,49	234,393	1279,15	0,734	1012,45	118,117	1019,32	0,712	975,836	3,3263	975,842
0,496	1246,14	194,997	1261,3	0,756	1016,95	130,062	1025,23	0,738	979,072	4,36343	979,082
0,511	1261,61	232,265	1282,81	0,782	1005,18	106,794	1010,84	0,765	980,029	6,92861	980,053
0,514	1250,22	224,742	1270,26	0,805	1012,17	126,48	1020,04	0,788	983,707	14,1256	983,808
0,534	1244,13	219,707	1263,38	0,821	1006,64	106,564	1012,26	0,799	976,951	14,8862	977,064
0,544	1257,91	221,084	1277,19	0,859	1006,07	131,271	1014,6	0,833	982,395	12,5812	982,476
0,553	1249,24	221,31	1268,69	0,885	1005,03	124,688	1012,74	0,840	988,481	33,2536	989,04
0,578	1240,68	186,179	1254,57	0,910	1005,91	122,324	1013,32	0,862	976,535	19,0765	976,721
0,599	1240,98	207,378	1258,19	0,915	1015,44	130,345	1023,77	0,884	972,174	31,0393	972,669
0,613	1252,72	188,389	1266,81	0,957	996,832	92,3358	1001,1	0,892	990,472	24,184	990,767
0,619	1244,41	205,646	1261,29	0,971	1000,84	109,447	1006,81	0,920	976,201	52,2768	977,6

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,639	1245,32	206,542	1262,33	0,985	997,265	117,26	1004,14	0,940	980,315	33,7382	980,895
0,647	1249,79	210,902	1267,46	1,016	999,552	119,166	1006,63	0,953	971,89	28,2767	972,301
0,666	1235,03	168,489	1246,47	1,031	1011,86	123,006	1019,31	0,977	973,517	27,0505	973,893
0,680	1235,26	187,629	1249,43	1,046	1005,29	116,561	1012,02	1,000	972,838	34,9664	973,466
0,684	1234,23	192,977	1249,23	1,083	999,583	105,451	1005,13	1,046	973,569	40,8558	974,426
0,705	1227,06	194,274	1242,34	1,097	994,284	98,198	999,121	1,070	977,105	34,2561	977,705
0,715	1233,47	183,83	1247,09	1,120	991,806	108,851	997,761	1,096	972,589	29,4666	973,035
0,731	1220,84	160,83	1231,39	1,138	993,52	107,753	999,346	1,108	976,047	39,2978	976,838
0,750	1225,88	189,274	1240,41	1,145	991,583	114,175	998,135	1,120	974,021	28,1613	974,428
0,753	1221,95	191,776	1236,91	1,187	991,897	109,626	997,937	1,164	970,621	43,8397	971,611
0,779	1218,49	176,132	1231,15	1,213	989,171	108,765	995,133	1,189	966,992	38,7401	967,768
0,782	1226,15	197,414	1241,94	1,237	989,012	114,506	995,619	1,215	969,044	46,0677	970,138
0,800	1210,78	185,791	1224,95	1,243	1002,7	110,775	1008,8	1,230	969,836	30,134	970,304
0,817	1214,15	176,055	1226,85	1,284	987,797	87,0118	991,622	1,262	963,003	38,3552	963,767
0,820	1208,23	176,222	1221,01	1,296	996,784	119,264	1003,89	1,274	970,073	43,4923	971,047
0,845	1207,31	184,591	1221,34	1,323	983,461	108,358	989,412	1,286	963,808	39,5403	964,619
0,849	1213,87	190,031	1228,65	1,345	990,471	107,139	996,249	1,311	966,605	37,6321	967,337
0,865	1199,84	175,93	1212,67	1,381	985,515	114,202	992,11	1,334	970,327	30,8831	970,818
0,881	1200,48	174,893	1213,15	1,390	989,101	88,0661	993,014	1,357	958,805	53,8712	960,317
0,888	1194,11	180,404	1207,66	1,424	979,092	75,6372	982,009	1,385	966,922	35,7617	967,583
0,911	1193,07	180,156	1206,6	1,441	981,161	95,0371	985,753	1,405	957,982	61,5167	959,955
0,918	1207,85	168,796	1219,59	1,474	969,735	83,7378	973,344	1,433	963,037	36,276	963,72
0,936	1191,47	141,402	1199,83	1,491	983,089	111,395	989,38	1,448	956,861	43,1321	957,833
0,950	1190,18	167,693	1201,94	1,530	966,859	83,5478	970,462	1,472	957,72	39,3068	958,526

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,959	1184,7	173,144	1197,29	1,536	982,455	107,639	988,334	1,493	960,269	36,027	960,945
0,978	1182,88	167,895	1194,74	1,580	972,123	89,579	976,242	1,540	955,213	34,1721	955,824
0,985	1194,28	164,834	1205,6	1,589	969,234	94,1529	973,796	1,540	957,816	49,8472	959,112
1,000	1177,76	167,926	1189,67	1,629	972,098	103,345	977,576	1,569	953,559	32,6589	954,118
1,019	1177,76	171,814	1190,23	1,649	966,031	88,7556	970,1	1,602	955,593	39,7086	956,418
1,022	1174,13	172,982	1186,8	1,674	972,554	97,3287	977,412	1,613	949,427	61,4302	951,412
1,049	1175,8	137,291	1183,79	1,710	967,079	99,3948	972,173	1,640	951,764	40,5165	952,626
1,055	1180,43	152,139	1190,19	1,721	976,209	98,4878	981,165	1,665	952,632	40,2895	953,484
1,072	1168,69	166,617	1180,51	1,746	969,575	97,1459	974,43	1,691	950,267	35,2303	950,92
1,091	1167,92	163,54	1179,31	1,772	970,534	94,7034	975,144	1,716	949,663	42,0975	950,596
1,107	1168,55	163,833	1179,98	1,804	961,117	85,8541	964,944	1,722	959,05	35,1617	959,694
1,127	1165,5	170,716	1177,94	1,815	972,143	104,413	977,734	1,747	951,014	35,4875	951,676
1,147	1166,4	168,508	1178,51	1,853	961,442	60,818	963,364	1,776	956,875	37,2891	957,601
1,161	1168	162,079	1179,19	1,863	970,766	106,239	976,562	1,801	943,982	62,8752	946,074
1,168	1161,75	163,231	1173,16	1,898	963,85	55,9503	965,473	1,827	944,544	44,8499	945,608
1,186	1161,56	162,667	1172,89	1,914	969,838	104,73	975,476	1,833	950,725	56,2338	952,387
1,190	1170,47	175,122	1183,5	1,959	956,358	82,2336	959,887	1,853	950,002	40,2515	950,854
1,201	1161,12	157,701	1171,78	2,000	961,229	67,258	963,579	1,879	947,038	35,6447	947,709
1,220	1156,84	161,901	1168,11	2,016	955,54	83,0936	959,146	1,892	954,423	50,1231	955,738
1,223	1170,58	173,319	1183,34	2,049	962,94	96,3553	967,749	1,905	951,96	40,9885	952,842
1,244	1159,29	134,981	1167,12	2,062	960,291	67,5728	962,666	1,947	944,161	65,3642	946,421
1,257	1165,15	164,525	1176,71	2,095	967,581	101,799	972,921	1,957	943,757	57,9951	945,537
1,273	1158,83	132,196	1166,35	2,108	960,002	91,155	964,32	1,999	946,206	41,6896	947,124
1,289	1162,77	160,247	1173,76	2,140	959,332	95,3295	964,057	2,008	940,054	63,5491	942,2

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,303	1149,79	131,17	1157,25	2,168	954,914	95,9251	959,72	2,044	945,831	32,1972	946,379
1,317	1158,88	158,511	1169,67	2,190	960,971	102,419	966,413	2,054	945,709	81,8645	949,246
1,324	1150,45	157,012	1161,11	2,223	951,028	82,8602	954,631	2,080	944,677	39,4842	945,502
1,349	1149,41	155,875	1159,93	2,228	960	103,743	965,589	2,104	949,321	43,6435	950,324
1,368	1156,75	166,255	1168,64	2,271	952,805	83,7773	956,481	2,129	938,87	59,0343	940,724
1,382	1160,71	145,508	1169,79	2,316	952,736	66,4443	955,05	2,157	944,223	32,365	944,778
1,397	1150,6	129,251	1157,84	2,321	957,848	99,407	962,992	2,162	954,186	33,344	954,768
1,414	1155,58	161,976	1166,88	2,364	947,876	76,3225	950,944	2,214	937,695	56,8783	939,418
1,426	1151,53	129,666	1158,81	2,410	944,726	69,2068	947,258	2,260	935,201	69,9957	937,817
1,446	1146,85	155,26	1157,31	2,460	952,064	89,5963	956,271	2,266	946,146	39,9104	946,987
1,467	1146,24	157,464	1157,01	2,465	950,486	92,9474	955,02	2,285	937,959	52,944	939,452
1,480	1155,55	151,519	1165,44	2,511	944,15	73,7758	947,028	2,319	949,49	32,3649	950,041
1,495	1150,99	136,196	1159,02	2,557	946,342	72,9157	949,147	2,333	944,442	48,8302	945,703
1,510	1152,06	156,857	1162,69	2,572	944,689	87,3246	948,716	2,370	943,283	38,3619	944,063
1,522	1142,98	130,656	1150,42	2,603	950,159	104,668	955,907	2,375	941,99	35,2573	942,65
1,537	1150,29	155,711	1160,78	2,621	941,649	76,3072	944,736	2,400	942,362	40,8249	943,246
1,543	1144,44	160,686	1155,67	2,654	948,584	97,9233	953,625	2,424	945,335	43,2191	946,322
1,565	1140,44	148,878	1150,12	2,669	945,185	58,408	946,988	2,444	940,544	53,7909	942,081
1,568	1154,49	163,063	1165,95	2,701	947,789	103,36	953,408	2,476	945,257	35,8738	945,937
1,589	1145,98	160,82	1157,21	2,721	939,845	74,1591	942,766	2,496	935,62	59,4032	937,504
1,599	1151,63	152,582	1161,69	2,748	947,911	95,2235	952,682	2,521	940,927	40,8354	941,813
1,614	1147,24	123,442	1153,86	2,767	938,054	71,9298	940,808	2,530	950,437	41,0426	951,323
1,631	1153,84	143,1	1162,68	2,788	945,571	83,6718	949,266	2,569	935,351	62,6733	937,448
1,643	1140,82	140,74	1149,47	2,817	937,145	70,4509	939,789	2,583	942,281	54,1948	943,838

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,659	1144,23	148,385	1153,81	2,839	948,174	90,9861	952,529	2,597	939,7	42,2385	940,649
1,665	1140,75	158,811	1151,75	2,869	937,447	72,9674	940,282	2,637	942,736	43,2983	943,73
1,684	1142,49	160,81	1153,75	2,891	951,799	101,54	957,2	2,688	939,435	52,3112	940,89
1,694	1153,76	168,724	1166,03	2,919	938,265	70,8103	940,933	2,720	936,625	37,3168	937,368
1,706	1142,74	153,739	1153,04	2,940	948,598	90,1215	952,869	2,747	946,835	44,5827	947,884
1,727	1144,26	158,721	1155,22	2,969	937,211	73,0456	940,053	2,776	935,443	65,9778	937,767
1,733	1143,57	126,894	1150,59	2,987	946,649	83,2252	950,3	2,796	947,461	36,2337	948,154
1,754	1142,33	156,849	1153,05	3,030	939,077	81,6032	942,616	2,825	934,666	66,5265	937,031
1,761	1152,74	143,743	1161,67	3,067	950,302	98,4557	955,389	2,852	937,186	45,8844	938,309
1,771	1142,31	149,24	1152,02	3,077	952,441	97,2259	957,391	2,901	932,541	70,3127	935,188
1,794	1146,44	166,366	1158,45	3,112	946,453	67,5487	948,86	2,907	947,783	36,5572	948,488
1,803	1138,09	130,803	1145,58	3,129	952,561	100,155	957,812	2,949	933,38	69,7634	935,984
1,826	1144,31	160,865	1155,56	3,160	938,33	68,5372	940,83	2,955	946,074	40,4414	946,938
1,831	1143,25	126,556	1150,23	3,181	946,038	85,5163	949,895	2,994	939,355	75,863	942,413
1,856	1141,8	153,788	1152,11	3,206	935,588	62,5212	937,675	2,999	942,173	45,3081	943,262
1,859	1139,13	127,821	1146,28	3,233	951,768	95,8423	956,581	3,038	936,17	44,2152	937,214
1,878	1141,64	149,458	1151,38	3,258	947,183	89,6082	951,412	3,050	943,501	51,1716	944,888
1,887	1149,87	148,927	1159,47	3,282	947,833	87,7919	951,89	3,068	938,067	36,4242	938,774
1,901	1140,57	156,177	1151,21	3,303	940,33	65,7909	942,629	3,104	942,436	41,5175	943,35
1,918	1145,89	153,445	1156,12	3,328	950,394	93,4082	954,973	3,109	936,614	62,4811	938,696
1,931	1143,65	137,887	1151,93	3,356	946,847	93,7049	951,472	3,136	936,177	55,4468	937,818
1,949	1145,46	146,244	1154,76	3,371	952,889	98,7785	957,995	3,158	943,48	43,6715	944,49
1,956	1137,7	148,758	1147,38	3,404	945,612	88,8883	949,781	3,174	939,332	44,8927	940,404
1,978	1140,48	157,166	1151,26	3,419	946,157	80,7487	949,596	3,196	940,106	39,9051	940,953

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,985	1150,94	157,444	1161,66	3,423	946,996	86,6271	950,95	3,215	942,397	46,6095	943,549
1,996	1142,08	155,999	1152,68	3,465	939,511	65,0941	941,763	3,221	939,892	43,4213	940,894
2,015	1143,55	152,111	1153,62	3,489	949,237	92,3261	953,716	3,244	941,365	43,1806	942,355
2,021	1153,65	141,709	1162,32	3,508	947,318	81,6518	950,83	3,269	943,772	49,5465	945,072
2,034	1141,05	158,988	1152,07	3,528	942,752	96,0894	947,636	3,295	938,474	58,3662	940,287
2,053	1146,49	150,72	1156,35	3,558	947,325	97,8972	952,37	3,323	949,719	40,5007	950,582
2,059	1142,65	159,344	1153,71	3,563	941,088	69,8053	943,673	3,339	941,166	42,8667	942,142
2,083	1143,38	158,75	1154,35	3,609	943,95	74,2993	946,87	3,366	944,787	43,2982	945,779
2,113	1140,5	140,501	1149,12	3,641	942,079	89,857	946,355	3,372	944,187	56,9307	945,902
2,135	1139,3	153,366	1149,58	3,664	949,718	89,1472	953,893	3,413	934,518	60,192	936,454
2,139	1152,98	154,794	1163,32	3,687	938,859	66,6981	941,225	3,424	950,98	39,0006	951,779
2,162	1133,71	119,834	1140,03	3,715	951,407	90,2657	955,679	3,445	943,419	34,4162	944,047
2,166	1154,33	162,992	1165,78	3,726	945,373	84,7705	949,166	3,477	943,966	36,44	944,669
2,193	1145,41	121,552	1151,84	3,759	945,494	90,5843	949,823	3,494	935,85	54,6537	937,445
2,199	1153,66	163,24	1165,15	3,770	939,512	62,0551	941,559	3,530	939,594	57,0297	941,323
2,226	1141,38	136,851	1149,55	3,810	940,232	66,4385	942,576	3,539	933,415	60,727	935,388
2,229	1140,76	140,109	1149,33	3,819	939,653	74,7125	942,619	3,580	933,179	64,4965	935,405

Г5. Числові значення силових параметрів різання при обробленні деталі з сплаву ХН60Ю.

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0	0,000	0	0	0

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,039	1840	534,844	1916,16	0,005	969,095	12,1041	969,171	0,006	587,807	3,63958	587,818
0,085	3001	737,922	3090,39	0,016	1604,49	140,467	1610,63	0,016	1183,63	3,37849	1183,63
0,097	3320	777,888	3409,91	0,030	1992,67	219,925	2004,77	0,020	1327,68	13,2047	1327,75
0,134	3754,2	823,108	3843,37	0,034	2053,15	225,066	2065,45	0,033	1570,75	43,745	1571,36
0,149	3846,71	848,887	3939,26	0,054	2311,68	369,041	2340,95	0,053	1821,83	52,6613	1822,59
0,181	4034,13	782,653	4109,35	0,057	2335,47	386,367	2367,21	0,057	1866,84	82,2335	1868,65
0,195	4099,77	904,666	4198,4	0,079	2451,19	443,822	2491,05	0,086	2107,05	94,8042	2109,18
0,213	4162,95	882,08	4255,38	0,088	2487	364,035	2513,5	0,099	2196,98	23,5138	2197,11
0,238	4291,99	851,246	4375,59	0,105	2538,22	482,898	2583,75	0,116	2276,99	57,8116	2277,72
0,251	4357,59	830,782	4436,08	0,119	2573,29	497,203	2620,88	0,142	2387,68	56,4968	2388,35
0,277	4455,61	856,778	4537,24	0,134	2600,92	475,132	2643,96	0,150	2407,03	49,4185	2407,54
0,302	4553,56	864,154	4634,83	0,137	2609,44	493,228	2655,65	0,181	2475,52	58,3439	2476,21
0,327	4650,1	843,595	4726	0,154	2644,43	520,571	2695,18	0,214	2537,13	39,3313	2537,43
0,350	4743,31	872,735	4822,93	0,165	2664,42	496,368	2710,26	0,224	2563,09	31,4929	2563,28
0,372	4814,96	910,594	4900,31	0,168	2671,31	507,285	2719,05	0,249	2615,53	116,134	2618,11
0,401	4938,27	875,913	5015,35	0,196	2695,46	455	2733,59	0,260	2620,04	54,987	2620,62
0,409	4979,83	931,483	5066,2	0,207	2712,01	488,06	2755,58	0,294	2664,2	83,9448	2665,52
0,427	4990,07	913,189	5072,94	0,232	2758,42	489,196	2801,46	0,299	2667,02	101,213	2668,94
0,447	5051,62	943,447	5138,96	0,245	2759,26	545,743	2812,71	0,332	2719,7	76,3591	2720,77
0,473	5124,76	850,402	5194,84	0,266	2794,78	560,116	2850,36	0,343	2730,94	118,969	2733,53
0,486	5181,41	936,354	5265,34	0,306	2823,05	557,792	2877,63	0,371	2751,24	84,8435	2752,55
0,494	5182,92	956,238	5270,39	0,310	2832,1	532,917	2881,8	0,384	2754,79	125,773	2757,66
0,516	5217,46	918,789	5297,74	0,332	2846,17	543,244	2897,55	0,416	2791,65	128,469	2794,6
0,528	5276,82	940,247	5359,93	0,344	2876,61	579,896	2934,48	0,425	2791,64	28,724	2791,79

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,532	5274,88	958,987	5361,34	0,348	2883,74	597,283	2944,95	0,458	2829,9	144,147	2833,57
0,559	5321,52	857,715	5390,2	0,370	2862,59	505,339	2906,85	0,462	2804,08	144,893	2807,82
0,564	5378,44	952,282	5462,09	0,387	2882,82	520,059	2929,35	0,483	2829,67	69,1837	2830,52
0,577	5369,79	942,562	5451,89	0,406	2883,47	426,846	2914,89	0,504	2811,39	66,7219	2812,18
0,601	5427,65	867,191	5496,49	0,434	2881,53	555,863	2934,65	0,509	2850,78	165,299	2855,57
0,606	5452,26	951,646	5534,69	0,442	2885,44	537,644	2935,1	0,528	2850,47	92,3412	2851,97
0,621	5400,74	874,31	5471,05	0,463	2898,68	550,315	2950,46	0,550	2854,2	86,6534	2855,52
0,634	5466,4	922,392	5543,68	0,480	2931,07	548,875	2982,02	0,556	2844,01	139,778	2847,44
0,648	5461,04	905,201	5535,55	0,491	2934,38	601,554	2995,41	0,571	2843,5	44,3151	2843,85
0,652	5459,48	906,266	5534,19	0,529	2938,04	594,45	2997,57	0,593	2841,86	77,6924	2842,92
0,666	5456,7	913,097	5532,57	0,549	2920,72	537,946	2969,85	0,607	2871,23	41,5674	2871,53
0,674	5511,83	860,812	5578,64	0,572	2958,72	575,588	3014,19	0,616	2842,53	54,1732	2843,05
0,683	5497,46	906,791	5571,74	0,581	2924,82	573,591	2980,53	0,640	2866,44	45,5353	2866,8
0,699	5507,9	904,997	5581,75	0,618	2938,12	519,799	2983,75	0,660	2874,31	41,9103	2874,62
0,703	5561,58	886,074	5631,72	0,657	2962,09	552,648	3013,2	0,685	2888,57	10,6249	2888,59
0,720	5514,98	792,293	5571,6	0,662	2969,46	532,847	3016,89	0,705	2898,52	59,6072	2899,13
0,727	5566,46	861,725	5632,77	0,693	2955,66	543,103	3005,14	0,723	2884,86	90,3995	2886,28
0,734	5544,32	868,974	5612	0,697	2983,13	531,889	3030,18	0,745	2886,75	55,316	2887,28
0,752	5519,47	811,027	5578,74	0,722	2989,12	569,398	3042,87	0,756	2907,09	3,61858	2907,09
0,771	5577,44	842,392	5640,7	0,739	2990	546,825	3039,59	0,766	2900,19	41,9994	2900,49
0,785	5588,41	867,885	5655,4	0,767	2977,89	434,29	3009,39	0,802	2907,71	72,0044	2908,6
0,787	5577,71	861,611	5643,87	0,777	2997,88	540,144	3046,15	0,839	2906,97	75,2887	2907,94
0,808	5554,85	731,914	5602,86	0,804	3013,76	537,641	3061,34	0,850	2923,93	86,5346	2925,21
0,810	5619,19	856,237	5684,05	0,823	3015,92	487,489	3055,06	0,866	2913,71	47,4793	2914,1

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,828	5584,07	787,248	5639,29	0,828	3018,81	504,496	3060,67	0,898	2919,58	99,0699	2921,26
0,837	5642,03	824,916	5702,02	0,860	2993,51	495,916	3034,31	0,905	2896,68	28,0836	2896,82
0,848	5585,01	747,015	5634,75	0,869	3025,97	542,222	3074,17	0,929	2926,52	44,1808	2926,85
0,860	5619,35	815,356	5678,2	0,901	3015,89	534,678	3062,92	0,945	2930,57	24,679	2930,67
0,862	5614,66	821,308	5674,41	0,914	3021,32	439,781	3053,16	0,951	2931,83	43,1135	2932,15
0,875	5597,5	791,713	5653,21	0,941	3019,1	529,429	3065,17	0,976	2923,42	22,5511	2923,51
0,891	5623,13	797,297	5679,37	0,958	3031,64	524,805	3076,73	0,997	2934,15	2,34274	2934,15
0,894	5608,56	786,055	5663,38	0,979	3041,52	518,418	3085,39	1,012	2948,5	61,2291	2949,14
0,915	5621,89	723,262	5668,22	1,002	3029,55	471,883	3066,08	1,039	2922,4	38,3089	2922,65
0,925	5671,16	792,082	5726,21	1,031	3036,4	511,167	3079,13	1,049	2932,9	39,3841	2933,16
0,940	5656,33	776,42	5709,37	1,048	3040,09	530,585	3086,04	1,063	2921,61	30,2633	2921,77
0,958	5621,1	746,018	5670,39	1,071	3037,48	521,417	3081,91	1,083	2919,58	99,0699	2921,26
0,962	5592,34	712,482	5637,54	1,088	3044,72	524,411	3089,55	1,103	2896,68	28,0836	2896,82
0,981	5635,71	775,928	5688,87	1,100	3037,87	469,91	3074	1,123	2926,52	44,1808	2926,85
0,992	5678,45	766,916	5730	1,131	3037,15	471,113	3073,47	1,143	2930,57	24,679	2930,67
1,004	5639,56	701,152	5682,98	1,145	3037,71	511,401	3080,46	1,163	2931,83	43,1135	2932,15
1,025	5612,47	722,78	5658,82	1,169	3060,47	448,381	3093,14	1,183	2923,42	22,5511	2923,51
1,027	5592,23	665,978	5631,75	1,186	3035,96	501,67	3077,13	1,203	2934,15	2,34274	2934,15
1,051	5622,39	637,14	5658,38	1,210	3065,85	460,677	3100,27	1,223	2948,5	61,2291	2949,14
1,059	5679,31	725,949	5725,52	1,222	3056,82	493,928	3096,47	1,243	2922,4	38,3089	2922,65
1,073	5653,45	663,929	5692,3	1,255	3026,03	468,865	3062,14	1,263	2932,9	39,3841	2933,16
1,092	5623,78	711,108	5668,56	1,259	3027,73	481,649	3065,8	1,283	2921,61	30,2633	2921,77
1,096	5680,72	724,701	5726,76	1,297	3046,09	477,213	3083,24	1,303	2907,71	72,0044	2908,6
1,111	5606,72	686,155	5648,55	1,335	3058,64	510,619	3100,97	1,323	2906,97	75,2887	2907,94

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,132	5612,53	629,604	5647,73	1,344	3058,9	489,619	3097,84	1,343	2923,93	86,5346	2925,21
1,151	5634,78	668,691	5674,32	1,373	3058,38	502,442	3099,38	1,363	2913,71	47,4793	2914,1
1,158	5723,64	698,02	5766,05	1,382	3072,81	478,954	3109,91	1,383	2919,58	99,0699	2921,26
1,173	5634,04	563,638	5662,16	1,421	3059,07	396,705	3084,69	1,403	2896,68	28,0836	2896,82
1,191	5661,36	694,593	5703,81	1,424	3040,66	403,869	3067,36	1,423	2926,52	44,1808	2926,85
1,211	5651,13	646,541	5687,99	1,454	3032,04	463,358	3067,24	1,443	2930,57	24,679	2930,67
1,222	5698,34	616,926	5731,64	1,462	3059,6	450,37	3092,57	1,463	2931,83	43,1135	2932,15
1,233	5649,99	629,867	5684,99	1,498	3033,4	459,568	3068,02	1,483	2923,42	22,5511	2923,51
1,252	5659,31	641,905	5695,6	1,502	3065,19	491,135	3104,29	1,503	2934,15	2,34274	2934,15
1,255	5646,48	577,113	5675,9	1,543	3061,68	475,554	3098,39	1,523	2948,5	61,2291	2949,14
1,275	5622,69	568,177	5651,32	1,548	3060,34	485,418	3098,6	1,543	2922,4	38,3089	2922,65
1,283	5733,56	632,935	5768,39	1,582	3057,95	485,726	3096,29	1,563	2932,9	39,3841	2933,16
1,292	5671,46	637,616	5707,19	1,587	3054,59	495,576	3094,53	1,583	2921,61	30,2633	2921,77
1,313	5665,96	566,435	5694,2	1,623	3047,47	497,237	3087,77	1,603	2919,58	99,0699	2921,26
1,343	5606,72	724,701	5653,36	1,662	3055,43	449,402	3088,3	1,623	2896,68	28,0836	2896,82
1,373	5612,53	686,155	5654,32	1,666	3057,52	463,903	3092,51	1,643	2926,52	44,1808	2926,85
1,403	5634,78	629,604	5669,85	1,698	3079,76	503,023	3120,57	1,663	2930,57	24,679	2930,67
1,433	5723,64	668,691	5762,57	1,715	3056,45	407,11	3083,44	1,683	2931,83	43,1135	2932,15
1,463	5634,04	698,02	5677,12	1,732	3072,52	467,546	3107,89	1,703	2923,42	22,5511	2923,51
1,493	5661,36	563,638	5689,35	1,758	3064,97	474,711	3101,51	1,723	2934,15	2,34274	2934,15
1,523	5651,13	694,593	5693,66	1,772	3076,86	453,253	3110,07	1,743	2948,5	61,2291	2949,14
1,553	5698,34	646,541	5734,9	1,792	3045,75	470,357	3081,85	1,763	2922,4	38,3089	2922,65
1,583	5649,99	616,926	5683,57	1,817	3057,88	493,767	3097,49	1,783	2934,15	2,34274	2934,15
1,613	5659,31	629,867	5694,25	1,840	3035,12	460,478	3069,85	1,803	2948,5	61,2291	2949,14

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,643	5646,48	641,905	5682,85	1,857	3066,31	494,82	3105,98	1,823	2922,4	38,3089	2922,65
1,673	5622,69	577,113	5652,23	1,881	3037,81	461,346	3072,64	1,843	2932,9	39,3841	2933,16
1,703	5733,56	568,177	5761,64	1,899	3071,85	487,653	3110,32	1,863	2921,61	30,2633	2921,77
1,733	5671,46	632,935	5706,67	1,927	3064,37	475,173	3100,99	1,883	2907,71	72,0044	2908,6
1,763	5665,96	637,616	5701,72	1,940	3071,2	493,69	3110,63	1,903	2906,97	75,2887	2907,94
1,793	5634,04	566,435	5662,44	1,973	3051,13	469,866	3087,1	1,923	2923,93	86,5346	2925,21
1,823	5661,36	724,701	5707,56	1,981	3075,58	457,289	3109,39	1,943	2913,71	47,4793	2914,1
1,853	5651,13	686,155	5692,63	1,999	3055,72	429,593	3085,77	1,963	2919,58	99,0699	2921,26
1,883	5698,34	629,604	5733,02	2,018	3071,94	506,092	3113,35	1,983	2896,68	28,0836	2896,82
1,913	5649,99	668,691	5689,42	2,043	3046,33	473,013	3082,83	2,003	2926,52	44,1808	2926,85
1,943	5659,31	698,02	5702,19	2,048	3059,24	406,238	3086,09	2,023	2930,57	24,679	2930,67
1,973	5646,48	563,638	5674,54	2,060	3056,82	429,489	3086,84	2,043	2931,83	43,1135	2932,15
2,003	5622,69	694,593	5665,43	2,090	3071,02	434,975	3101,67	2,063	2923,42	22,5511	2923,51
2,033	5733,56	646,541	5769,9	2,107	3056,77	468,867	3092,52	2,083	2934,15	2,34274	2934,15
2,063	5671,46	616,926	5704,92	2,128	3072,7	489,053	3111,38	2,103	2948,5	61,2291	2949,14
2,093	5665,96	629,867	5700,86	2,152	3053,23	455,073	3086,96	2,123	2919,58	99,0699	2921,26
2,123	5606,72	641,905	5643,35	2,164	3076,23	409,171	3103,32	2,143	2896,68	28,0836	2896,82
2,153	5612,53	577,113	5642,12	2,186	3059,11	491,058	3098,27	2,163	2926,52	44,1808	2926,85
2,183	5634,78	568,177	5663,35	2,203	3082,57	502,606	3123,28	2,183	2930,57	24,679	2930,67
2,213	5723,64	632,935	5758,53	2,229	3052,13	468,804	3087,92	2,203	2931,83	43,1135	2932,15
2,243	5659,31	637,616	5695,12	2,242	3076,72	438,285	3107,78	2,223	2923,42	22,5511	2923,51
2,273	5646,48	566,435	5674,82	2,276	3064,6	456,846	3098,46	2,243	2934,15	2,34274	2934,15
2,303	5622,69	646,541	5659,74	2,285	3085,83	466,988	3120,97	2,263	2948,5	61,2291	2949,14
2,333	5733,56	616,926	5766,65	2,318	3054,82	473,04	3091,23	2,283	2922,4	38,3089	2922,65

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
2,363	5671,46	629,867	5706,33	2,321	3076,85	436,033	3107,59	2,303	2934,15	2,34274	2934,15
2,393	5665,96	641,905	5702,21	2,362	3048,79	425,957	3078,4	2,323	2948,5	61,2291	2949,14
2,423	5634,04	577,113	5663,52	2,369	2990,15	397,597	3016,47	2,343	2922,4	38,3089	2922,65
2,453	5661,36	568,177	5689,8	2,387	2981,52	549,902	3031,81	2,363	2932,9	39,3841	2933,16
2,483	5651,13	632,935	5686,46	2,389	2947,4	558,26	2999,8	2,383	2921,61	30,2633	2921,77
2,513	5698,34	637,616	5733,9	2,409	3008,65	448,713	3041,93	2,403	2907,71	72,0044	2908,6
2,543	5649,99	566,435	5678,31	2,414	3007,86	457,943	3042,52	2,423	2906,97	75,2887	2907,94
2,573	5659,31	724,701	5705,52	2,448	2798,08	508,626	2843,93	2,443	2923,93	86,5346	2925,21
2,603	5646,48	686,155	5688,02	2,452	2773,96	498,334	2818,37	2,463	2913,71	47,4793	2914,1
2,633	5622,69	629,604	5657,83	2,484	2622,01	521,715	2673,41	2,483	2896,68	28,0836	2896,82
2,663	5733,56	668,691	5772,42	2,493	2465,21	435,581	2503,4	2,503	2926,52	44,1808	2926,85
2,693	5671,46	698,02	5714,25	2,518	2371,81	520,769	2428,31	2,523	2930,57	24,679	2930,67
2,723	5671,46	563,638	5699,4	2,532	2275,79	369,612	2305,61	2,543	2931,83	43,1135	2932,15
2,753	5665,96	694,593	5708,38	2,547	2355,63	513,395	2410,93	2,563	2923,42	22,5511	2923,51
2,783	5634,04	646,541	5671,02	2,558	2382,81	535,273	2442,19	2,583	2934,15	2,34274	2934,15
2,813	5661,36	616,926	5694,87	2,580	2042,64	466,895	2095,32	2,603	2948,5	61,2291	2949,14
2,843	5651,13	629,867	5686,12	2,598	1895,35	429,77	1943,46	2,623	2919,58	99,0699	2921,26
2,873	5698,34	563,638	5726,15	2,610	2087,84	450,129	2135,81	2,643	2896,68	28,0836	2896,82

Г6. Числові значення силових параметрів різання при обробленні деталі з сплаву ВТ6.

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0	0,000	0	0	0
0,013	3020,91	492,777	3060,84	0,005	1064,03	10,8722	1064,09	0,006	614,697	0,07069	614,697
0,017	3054,05	537,477	3100,98	0,016	1743,83	121,526	1748,06	0,012	1009,7	18,2983	1009,87
0,028	3128,12	645,717	3194,07	0,023	2005,74	164,51	2012,48	0,018	1313,85	46,6501	1314,68
0,046	3126,57	690,15	3201,83	0,029	2170,7	233,195	2183,19	0,024	1550,46	41,1522	1551,01
0,048	3147,17	715,455	3227,47	0,046	2331,19	306,934	2351,31	0,041	1775,28	17,8452	1775,37
0,060	3122,98	726,9	3206,46	0,066	2417,17	381,397	2447,07	0,054	1886,03	23,3885	1886,18
0,069	3111,64	721,054	3194,09	0,076	2419,83	388,23	2450,78	0,066	2030,16	28,6871	2030,36
0,073	3102,04	731,432	3187,11	0,090	2431,37	434,586	2469,9	0,092	2197,22	22,177	2197,33
0,084	3100,88	765,594	3193,99	0,106	2388,24	425,454	2425,84	0,095	2195,69	23,0541	2195,81
0,090	3082,13	754,851	3173,22	0,109	2412,17	479,164	2459,3	0,117	2290,29	31,7685	2290,51
0,096	3033,28	741,174	3122,52	0,130	2390,86	463,968	2435,46	0,124	2279,92	61,7007	2280,75
0,109	2969,39	713,857	3053,99	0,136	2403,42	499,868	2454,85	0,150	2323,88	64,2639	2324,77
0,110	2951,41	716,209	3037,07	0,160	2218,24	437,298	2260,93	0,150	2334,48	49,2047	2335
0,125	2926,88	748,218	3021	0,186	2230,7	409,491	2267,97	0,178	2315,85	39,7277	2316,19
0,127	2939,16	722,63	3026,69	0,221	2209,82	360,429	2239,02	0,203	2342,8	77,7932	2344,09
0,141	2806,29	678,669	2887,19	0,225	2212,32	377,835	2244,35	0,208	2317,14	61,5128	2317,96
0,146	2856,58	647,57	2929,06	0,252	2173,6	345,912	2200,95	0,234	2333,88	58,9073	2334,62
0,155	2783,81	681,064	2865,91	0,257	2264,93	405,193	2300,89	0,260	2329,97	85,8514	2331,55
0,171	2594,33	640,585	2672,25	0,283	1551,69	275,844	1576,02	0,271	2286,24	150,517	2291,19
0,173	2534,16	661,4	2619,05	0,283	1723,66	401,004	1769,69	0,291	2171,56	141,903	2176,19

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,190	2023,04	622,096	2116,53	0,300	1610,92	360,582	1650,78	0,297	2005,85	159,704	2012,2
0,199	1839,68	512,124	1909,63	0,308	1657,39	433,34	1713,1	0,313	1760,44	202,6	1772,06
0,204	2004,35	593,952	2090,5	0,314	1491,84	390,549	1542,11	0,327	1591,09	245,412	1609,91
0,208	1745,15	504,585	1816,63	0,327	1357,99	385,769	1411,72	0,334	1351,65	217,031	1368,96
0,220	1588,28	507,9	1667,51	0,334	1204,62	293,833	1239,94	0,343	1531,7	236,378	1549,83
0,220	1857,53	550,14	1937,28	0,341	1335,7	438,66	1405,89	0,353	1469,79	243,976	1489,9
0,233	1596,96	553,583	1690,19	0,348	1221,37	399,845	1285,15	0,372	1263,56	290,298	1296,48
0,233	1668,02	540,9	1753,53	0,360	1210,76	402,548	1275,93	0,374	1245,33	278,254	1276,04
0,243	1465,1	516,079	1553,34	0,364	1147,96	392,212	1213,11	0,391	1059,57	339,762	1112,71
0,244	1451,31	524,672	1543,24	0,373	1130,38	427,094	1208,37	0,410	1050,64	346,964	1106,45
0,250	1505,08	588,939	1616,2	0,375	1179,21	456,37	1264,44	0,426	1009,15	372,408	1075,67
0,255	1438,32	562,737	1544,49	0,382	1185,5	431,896	1261,72	0,435	1138,22	367,758	1196,16
0,261	1294,01	599,392	1426,09	0,396	1226,88	432,322	1300,82	0,440	1128,8	397,509	1196,75
0,262	1487,78	585,368	1598,79	0,403	1077,08	311,036	1121,09	0,456	1144,48	368,794	1202,43
0,269	1351,88	597,111	1477,88	0,410	1226,77	451,198	1307,11	0,460	1097,28	341,049	1149,06
0,277	1403,98	596,888	1525,59	0,423	1248,25	373,15	1302,83	0,473	1180,01	383,196	1240,67
0,279	1350,95	618,111	1485,64	0,426	1369,47	427,53	1434,65	0,475	1300,83	397,394	1360,18
0,288	1327,52	615,823	1463,4	0,437	1282,38	364,884	1333,28	0,486	1255,13	382,896	1312,23
0,297	1303,46	569,722	1422,53	0,442	1428,35	436,581	1493,58	0,496	1378,57	316,814	1414,51
0,298	1301,16	596,769	1431,49	0,453	1420,89	392,44	1474,09	0,503	1349,52	374,404	1400,49
0,308	1481,12	590,813	1594,61	0,456	1398,6	368,912	1446,44	0,519	1432,4	337,943	1471,73
0,313	1575,89	579,467	1679,05	0,464	1539,44	399,717	1590,49	0,525	1528,11	333,202	1564,02
0,319	1553,6	548,423	1647,56	0,469	1543,96	398,455	1594,55	0,543	1464,65	305,39	1496,15
0,324	1698,41	584,005	1796,01	0,476	1666,06	407,868	1715,26	0,547	1651,67	286,754	1676,38

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,332	1735,92	626,119	1845,38	0,478	1679,56	416,221	1730,36	0,559	1658,86	251,29	1677,79
0,344	1924,61	515,087	1992,34	0,488	1707,75	351,541	1743,56	0,571	1807,73	166,368	1815,37
0,351	1990,42	510,98	2054,96	0,496	1793,59	320,561	1822,01	0,585	1855,42	156,381	1862
0,355	1991,76	456,186	2043,33	0,512	1749,08	189,237	1759,29	0,597	1930,25	118,39	1933,88
0,362	2061,85	550,346	2134,04	0,518	1901,43	323,362	1928,73	0,610	1964,02	108,15	1967
0,370	2142,57	493,862	2198,75	0,535	1854,01	197,536	1864,5	0,629	1982,23	68,9678	1983,43
0,377	2145,7	490,345	2201,01	0,550	1999,42	306,205	2022,73	0,643	2080,24	30,4568	2080,46
0,385	2266,62	460,056	2312,84	0,557	1959,82	174,209	1967,55	0,648	2064,74	47,5672	2065,29
0,389	2255,73	503,564	2311,25	0,590	2128,77	225,782	2140,71	0,671	2131,92	2,8852	2131,92
0,398	2348,97	484,168	2398,35	0,619	2141,28	257,511	2156,71	0,695	2158,52	33,5404	2158,78
0,400	2353,75	511,132	2408,61	0,630	2200,88	321,039	2224,17	0,707	2129,71	71,9563	2130,93
0,414	2409,46	530,542	2467,18	0,648	2156,02	235,948	2168,89	0,733	2186,24	31,3057	2186,46
0,420	2474,44	478,091	2520,2	0,659	2202,72	306,071	2223,88	0,738	2221,65	8,65119	2221,67
0,431	2403,2	483,012	2451,26	0,673	2145,3	186,299	2153,37	0,757	2213,05	11,8103	2213,08
0,443	2497,08	490,291	2544,76	0,695	2117,01	176,991	2124,4	0,776	2201,33	34,634	2201,6
0,452	2260,38	406,489	2296,64	0,720	1962,59	226,22	1975,58	0,804	2213,96	7,35084	2213,97
0,458	2435,81	471,036	2480,94	0,732	1742,31	353,213	1777,75	0,813	2210,83	6,29664	2210,84
0,470	2181,11	555,496	2250,74	0,734	1703,97	334,867	1736,56	0,822	2047,55	69,5828	2048,73
0,471	2491,86	446,36	2531,52	0,748	1319,97	367,751	1370,24	0,838	1865,18	73,145	1866,61
0,488	2281,51	494,42	2334,47	0,756	1310,13	356,111	1357,67	0,850	1648,65	203,735	1661,19
0,488	2349,7	447,606	2391,95	0,770	933,591	247,084	965,734	0,853	1635,92	192,736	1647,23
0,502	2311,67	452,333	2355,51	0,777	1073,86	382,31	1139,88	0,868	1440,87	235,703	1460,02
0,505	2307,18	434,265	2347,69	0,792	770,833	225,753	803,211	0,868	1632,34	269,616	1654,46
0,513	2286,03	426,976	2325,56	0,792	1014,57	388,084	1086,26	0,880	1301,28	195,483	1315,88

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,517	2364,95	409,203	2400,09	0,809	833,862	231,084	865,289	0,893	1082,68	310,921	1126,44
0,524	2341,5	400,088	2375,44	0,811	938,356	369,137	1008,35	0,907	891,756	308,573	943,634
0,534	2403,28	419,671	2439,65	0,814	932,957	374,395	1005,28	0,924	841,019	414,493	937,613
0,538	2394,03	437,06	2433,6	0,828	865,718	286,866	912,009	0,937	888,438	367,931	961,611
0,549	2407,85	435,825	2446,97	0,834	1022,4	412,585	1102,51	0,951	949,491	329,223	1004,95
0,551	2484,59	419,568	2519,77	0,845	914,72	399,675	998,225	0,957	908,429	362,058	977,921
0,562	2490,7	447,65	2530,61	0,856	924,014	421,122	1015,45	0,969	1026,35	403,058	1102,66
0,574	2515,63	453,594	2556,2	0,860	876,862	358,335	947,254	0,971	1001,9	391,911	1075,82
0,592	2469,29	420,442	2504,83	0,869	1030,05	425,964	1114,65	0,988	1116,22	402,882	1186,7
0,592	2578,66	464,325	2620,13	0,876	937,518	345,744	999,239	0,994	1181,03	414,979	1251,81
0,602	2525,7	466,479	2568,42	0,885	1033,29	458,027	1130,26	1,010	1204,97	395,49	1268,21
0,613	2451,98	483,737	2499,24	0,891	1043,83	427,331	1127,92	1,020	1251,11	398,616	1313,08
0,624	2120,59	492,476	2177,02	0,902	1123,27	448,125	1209,36	1,023	1248,47	364,383	1300,56
0,632	1877,13	464,555	1933,76	0,907	1097,78	406,686	1170,69	1,036	1347,09	340,966	1389,57
0,638	1630,63	504,663	1706,94	0,920	1250,2	430,836	1322,35	1,045	1374,54	358,51	1420,52
0,647	1407,57	545,712	1509,65	0,926	1133,72	290,209	1170,27	1,047	1385,61	365,347	1432,97
0,651	1222,79	502,73	1322,1	0,940	1358,33	400,276	1416,08	1,067	1472,01	322,698	1506,97
0,656	991,477	517,125	1118,23	0,944	1350,94	356,44	1397,17	1,070	1566,15	331,082	1600,76
0,661	990,401	422,852	1076,89	0,955	1498,85	411,723	1554,37	1,083	1571,42	319,137	1603,5
0,666	936,635	510,09	1066,53	0,976	1634,92	304,986	1663,12	1,094	1687,8	208,714	1700,66
0,673	1045,58	520,305	1167,88	0,992	1752,41	379,755	1793,09	1,101	1688,46	243,651	1705,95
0,682	1049,29	524,529	1173,09	0,999	1832,2	351,823	1865,67	1,123	1859,01	176,278	1867,35
0,688	972,248	511,081	1098,39	1,020	1877,1	253,612	1894,16	1,129	1860,47	65,6267	1861,63
0,691	962,344	526,715	1097,06	1,032	2003,05	327,751	2029,69	1,152	1929,36	99,6765	1931,93

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,699	1040,82	494,594	1152,36	1,052	2030,96	240,406	2045,14	1,172	2082,2	18,4809	2082,28
0,701	1163,56	548,397	1286,32	1,076	2078,73	214,546	2089,77	1,194	2102,68	41,8739	2103,1
0,708	992,41	549,549	1134,41	1,084	2081,55	240,984	2095,45	1,199	2142,04	27,6327	2142,22
0,715	1091,95	538,106	1217,34	1,107	2115,93	196,002	2124,99	1,210	2132,65	65,9075	2133,67
0,717	1092,2	623,181	1257,48	1,115	2164,03	302,539	2185,08	1,229	2162,54	109,065	2165,29
0,727	1121,85	597,746	1271,16	1,140	2132,25	221,184	2143,69	1,238	2162,58	38,3381	2162,92
0,731	1205,49	569,066	1333,06	1,147	2170,78	280,99	2188,89	1,246	2149,08	46,8251	2149,59
0,737	1207,84	604,758	1350,78	1,164	2132,34	170,047	2139,11	1,271	2163,04	68,9871	2164,14
0,746	1287,25	544,098	1397,52	1,183	2157,62	297,574	2178,04	1,273	2155,92	71,575	2157,11
0,747	1388,92	626,575	1523,71	1,186	2144,58	241,417	2158,13	1,298	2151,97	74,8605	2153,27
0,755	1339,55	667,259	1496,54	1,203	2150,96	258,133	2166,39	1,302	2205,91	40,356	2206,28
0,756	1377,64	601,399	1503,19	1,220	2026,05	274,3	2044,53	1,315	2183,01	55,836	2183,72
0,764	1350,05	616,695	1484,23	1,223	1907,88	219,015	1920,41	1,333	2059,71	33,1546	2059,98
0,768	1450,8	578,241	1561,79	1,242	1685,38	283,857	1709,12	1,340	1978,49	98,2619	1980,93
0,770	1439,94	600,676	1560,2	1,243	1768,61	320,738	1797,46	1,351	1766,59	147,898	1772,77
0,778	1539,42	557,236	1637,17	1,259	1354,38	349,249	1398,69	1,367	1494,36	217,745	1510,14
0,782	1488,63	477,982	1563,49	1,269	1177,54	359,412	1231,17	1,369	1694,89	216,523	1708,66
0,788	1743,73	558,899	1831,11	1,277	1094,88	312,067	1138,48	1,377	1530,89	230,48	1548,14
0,792	1756,7	609,125	1859,31	1,291	1002,98	343,559	1060,19	1,391	1121,77	169,753	1134,54
0,803	1858,48	603,729	1954,08	1,295	960,765	304,176	1007,77	1,395	1317,78	295,429	1350,49
0,804	1915,7	553,936	1994,18	1,315	876,564	318,813	932,741	1,402	1157,13	229,017	1179,58
0,814	1937,47	577,305	2021,65	1,334	817,28	298,753	870,172	1,415	1132,66	275,255	1165,63
0,821	2085,79	486,53	2141,78	1,336	998,547	444,501	1093,01	1,424	1107,09	300,967	1147,27
0,826	2082,5	530,333	2148,97	1,347	917,642	402,608	1002,08	1,426	1043,1	277,002	1079,25

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
0,833	2247,06	493,253	2300,56	1,349	1056,26	447,802	1147,26	1,440	979,316	272,306	1016,47
0,842	2266,63	532,413	2328,32	1,365	961,124	435,279	1055,1	1,447	1020,01	366,507	1083,86
0,854	2409,58	475,277	2456,01	1,370	1061,07	468,306	1159,82	1,460	876,762	306,353	928,743
0,857	2406,1	488,096	2455,11	1,383	1005,34	408,809	1085,28	1,465	998,237	318,733	1047,89
0,871	2462,56	434,956	2500,68	1,389	1152,7	388,009	1216,25	1,479	895,291	336,502	956,441
0,882	2511,53	423,218	2546,94	1,398	1128,91	348,005	1181,33	1,481	1129,27	427,763	1207,57
0,884	2518,59	447,313	2558	1,413	1257,63	451,787	1336,32	1,494	1054,12	416,683	1133,49
0,897	2558,96	430,189	2594,87	1,419	1165,43	293,627	1201,85	1,498	1077,06	408,057	1151,77
0,908	2582,49	408,329	2614,57	1,427	1390,05	431,185	1455,39	1,501	1077,64	412,839	1154,01
0,911	2584,67	434,103	2620,87	1,437	1329,52	318,735	1367,19	1,510	1135,13	436,078	1216,01
0,924	2540,08	387,204	2569,42	1,449	1530,02	426,367	1588,32	1,513	1189,92	407,415	1257,73
0,926	2589,32	424,353	2623,86	1,458	1487,56	361,749	1530,91	1,523	1152,07	266,716	1182,54
0,937	2585,12	473,198	2628,07	1,463	1662,33	422,312	1715,14	1,531	1327,33	362,159	1375,85
0,945	2571,04	340,125	2593,44	1,478	1550,13	350,747	1589,32	1,537	1350,45	318,175	1387,43
0,947	2564,12	347,775	2587,6	1,478	1749,26	380,471	1790,16	1,546	1301,6	261,896	1327,69
0,958	2577,21	420,447	2611,28	1,497	1740,07	319,273	1769,12	1,554	1403,7	362,124	1449,66
0,962	2584,38	390,874	2613,77	1,506	1658,97	333,197	1692,1	1,566	1374,38	284,043	1403,42
0,969	2534,59	391,404	2564,63	1,520	1882,41	251,747	1899,17	1,569	1504,92	301,922	1534,91
0,971	2626,15	458,786	2665,92	1,537	1869,03	295,71	1892,28	1,580	1448,73	224,886	1466,08
0,977	2554,52	449,225	2593,72	1,547	1922,45	256,592	1939,5	1,594	1617,35	183,005	1627,67
0,984	2568,88	389,231	2598,2	1,575	1929,02	210,377	1940,46	1,624	1779,59	128,801	1784,25
0,986	2551,04	424,121	2586,06	1,606	1974,68	179,46	1982,82	1,644	1847,43	115,501	1851,04
0,997	2192,62	552,672	2261,2	1,611	2076,32	289,178	2096,36	1,661	2008,19	62,9454	2009,18
1,008	1927,89	541,86	2002,59	1,632	2025,63	204,541	2035,93	1,684	2079,14	59,1389	2079,98

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,012	1988,72	525,98	2057,1	1,650	2085,52	273,913	2103,43	1,696	2114,47	18,6487	2114,55
1,019	1600,09	563,696	1696,48	1,654	2082,78	247,101	2097,39	1,702	2103,8	45,6373	2104,29
1,022	1660,94	505,3	1736,1	1,675	2071,68	235,615	2085,04	1,725	2180,92	65,8536	2181,91
1,024	1467,09	500,259	1550,04	1,685	2120,62	293,236	2140,8	1,738	2176,5	103,097	2178,94
1,034	1227,98	481,695	1319,08	1,692	2112,35	333,86	2138,57	1,763	2221,7	50,8157	2222,28
1,035	1189,47	476,101	1281,21	1,712	1887,92	266,39	1906,62	1,776	2173,95	123,053	2177,43
1,049	1042,57	548,085	1177,86	1,716	2069,88	346,632	2098,7	1,792	2208	127,184	2211,66
1,062	1007,23	497,283	1123,3	1,736	1410,51	146,732	1418,12	1,800	2223,69	82,801	2225,23
1,071	978,985	549,095	1122,46	1,738	1729,67	352,249	1765,17	1,823	2186,74	46,4535	2187,23
1,075	1107,06	529,157	1227,02	1,746	1252,35	342,414	1298,32	1,833	2203,25	4,82971	2203,26
1,082	1089,4	480,27	1190,57	1,752	1100	365,043	1158,99	1,839	2175,16	36,0982	2175,46
1,087	1085,67	508,997	1199,07	1,764	926,833	236,841	956,615	1,854	2061,45	50,2545	2062,06
1,092	1089,84	538,831	1215,77	1,765	980	428,198	1069,46	1,864	1845,48	144,764	1851,15
1,097	1160,38	465,716	1250,35	1,781	960	379,386	1032,25	1,875	1499,06	234,331	1517,26
1,102	1132,66	557,125	1262,26	1,782	965,139	324,23	1018,14	1,887	1327,72	261,706	1353,27
1,110	1230,73	515,505	1334,33	1,795	905,204	262,318	942,446	1,891	1458,32	291,518	1487,17
1,113	1191,34	504,927	1293,93	1,798	910,553	231,476	939,515	1,901	1151,4	208,89	1170,2
1,120	1298,99	562,401	1415,51	1,814	859,54	348,922	927,661	1,915	1158,71	252,229	1185,84
1,125	1236,28	499,719	1333,46	1,818	772,546	281,41	822,204	1,917	1035,08	263,654	1068,13
1,128	1380,55	596,61	1503,95	1,830	1135,15	461,074	1225,22	1,935	1045,05	210,948	1066,13
1,135	1407,57	593,774	1527,68	1,836	1123,46	423,858	1200,76	1,944	1051,89	301,872	1094,35
1,136	1529,97	550,255	1625,91	1,856	1226,88	432,322	1300,82	1,952	903,764	303,951	953,507
1,143	1474,69	533,732	1568,3	1,876	1077,08	311,036	1121,09	1,961	1032,5	372,276	1097,56
1,146	1615,87	556,567	1709,04	1,896	1226,77	451,198	1307,11	1,964	1155,94	264,261	1185,76

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,153	1581,03	574,414	1682,14	1,916	1248,25	373,15	1302,83	1,966	1033,59	243,132	1061,8
1,156	1707,8	535,17	1789,69	1,936	1369,47	427,53	1434,65	1,971	1003,74	284,537	1043,29
1,159	1685,35	458,99	1746,73	1,956	1282,38	364,884	1333,28	1,981	1036,72	382,958	1105,19
1,169	1830,48	494,634	1896,13	1,976	1428,35	436,581	1493,58	1,987	1067,91	276,807	1103,2
1,172	1824,93	546,675	1905,05	1,996	1420,89	392,44	1474,09	1,997	1038,73	279,752	1075,74
1,175	1858,99	542,638	1936,57	2,016	1398,6	368,912	1446,44	2,009	1028,09	399,745	1103,07
1,179	1955,43	531,026	2026,25	2,036	1539,44	399,717	1590,49	2,012	1080,83	397,344	1151,55
1,181	1941,57	518,551	2009,62	2,056	1543,96	398,455	1594,55	2,018	1069,32	342,934	1122,96
1,191	1924,61	515,087	1992,34	2,076	1666,06	407,868	1715,26	2,026	1117,42	290,788	1154,64
1,201	1990,42	510,98	2054,96	2,096	1679,56	416,221	1730,36	2,037	1147,51	349,575	1199,58
1,211	1991,76	456,186	2043,33	2,116	1707,75	351,541	1743,56	2,038	1125,96	350,646	1179,3
1,221	2061,85	550,346	2134,04	2,136	1793,59	320,561	1822,01	2,047	1133,94	363,317	1190,72
1,231	2142,57	493,862	2198,75	2,156	1749,08	189,237	1759,29	2,051	1266,61	391,575	1325,76
1,241	2145,7	490,345	2201,01	2,176	1901,43	323,362	1928,73	2,066	1131,26	277,984	1164,91
1,251	2266,62	460,056	2312,84	2,196	1854,01	197,536	1864,5	2,066	1345,23	374,243	1396,32
1,261	2255,73	503,564	2311,25	2,216	1999,42	306,205	2022,73	2,088	1324,56	232,156	1344,75
1,271	2348,97	484,168	2398,35	2,236	1959,82	174,209	1967,55	2,091	1447,72	304,48	1479,39
1,281	2353,75	511,132	2408,61	2,256	2128,77	225,782	2140,71	2,108	1447,56	358,188	1491,22
1,291	2409,46	530,542	2467,18	2,276	2141,28	257,511	2156,71	2,117	1574,48	266,144	1596,82
1,301	2474,44	478,091	2520,2	2,296	2200,88	321,039	2224,17	2,130	1549,96	246,803	1569,49
1,311	2520	483,012	2565,87	2,316	2156,02	235,948	2168,89	2,140	1571,42	319,137	1603,5
1,321	2623	490,291	2668,43	2,336	2202,72	306,071	2223,88	2,150	1687,8	208,714	1700,66
1,331	2730	406,489	2760,1	2,356	2145,3	186,299	2153,37	2,160	1688,46	243,651	1705,95
1,341	2435,81	471,036	2480,94	2,376	2117,01	176,991	2124,4	2,170	1859,01	176,278	1867,35

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,351	2440	555,496	2502,43	2,396	1962,59	226,22	1975,58	2,180	1860,47	65,6267	1861,63
1,361	2491,86	446,36	2531,52	2,416	1742,31	353,213	1777,75	2,190	1929,36	99,6765	1931,93
1,371	2281,51	494,42	2334,47	2,436	1703,97	334,867	1736,56	2,200	2082,2	18,4809	2082,28
1,381	2349,7	447,606	2391,95	2,456	1319,97	367,751	1370,24	2,210	2102,68	41,8739	2103,1
1,391	2311,67	452,333	2355,51	2,476	1310,13	356,111	1357,67	2,220	2142,04	27,6327	2142,22
1,401	2307,18	434,265	2347,69	2,496	933,591	247,084	965,734	2,230	2132,65	65,9075	2133,67
1,411	2286,03	426,976	2325,56	2,516	1073,86	382,31	1139,88	2,240	2162,54	109,065	2165,29
1,421	2364,95	409,203	2400,09					2,250	2162,58	38,3381	2162,92
1,431	2341,5	400,088	2375,44					2,260	2149,08	46,8251	2149,59
1,441	2403,28	419,671	2439,65					2,270	2163,04	68,9871	2164,14
1,451	2394,03	437,06	2433,6					2,280	2155,92	71,575	2157,11
1,461	2407,85	435,825	2446,97					2,290	2151,97	74,8605	2153,27
1,471	2484,59	419,568	2519,77					2,300	2205,91	40,356	2206,28
1,481	2490,7	447,65	2530,61					2,310	2183,01	55,836	2183,72
1,491	2515,63	453,594	2556,2					2,320	2059,71	33,1546	2059,98
1,501	2469,29	420,442	2504,83					2,330	1978,49	98,2619	1980,93
1,511	2578,66	464,325	2620,13					2,340	1766,59	147,898	1772,77
1,521	2525,7	466,479	2568,42					2,350	1494,36	217,745	1510,14
1,531	2451,98	483,737	2499,24					2,360	1694,89	216,523	1708,66
1,541	2120,59	492,476	2177,02					2,370	1530,89	230,48	1548,14
1,551	1877,13	464,555	1933,76					2,380	1121,77	169,753	1134,54
1,561	1630,63	504,663	1706,94					2,390	1317,78	295,429	1350,49
1,571	1407,57	545,712	1509,65					2,400	1157,13	229,017	1179,58
1,581	1222,79	502,73	1322,1					2,410	1132,66	275,255	1165,63

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,591	991,477	517,125	1118,23					2,420	1107,09	300,967	1147,27
1,601	990,401	422,852	1076,89					2,430	1043,1	277,002	1079,25
1,611	936,635	510,09	1066,53					2,440	979,316	272,306	1016,47
1,621	1045,58	520,305	1167,88					2,450	1020,01	366,507	1083,86
1,631	1049,29	524,529	1173,09					2,460	876,762	306,353	928,743
1,641	972,248	511,081	1098,39					2,470	998,237	318,733	1047,89
1,651	962,344	526,715	1097,06					2,480	895,291	336,502	956,441
1,661	1040,82	494,594	1152,36					2,490	1129,27	427,763	1207,57
1,671	1163,56	548,397	1286,32					2,500	1054,12	416,683	1133,49
1,681	992,41	549,549	1134,41					2,510	1077,06	408,057	1151,77
1,691	1091,95	538,106	1217,34					2,520	1077,64	412,839	1154,01
1,701	1092,2	623,181	1257,48					2,530	1135,13	436,078	1216,01
1,711	1121,85	597,746	1271,16					2,540	1189,92	407,415	1257,73
1,721	1205,49	569,066	1333,06					2,550	1152,07	266,716	1182,54
1,731	1207,84	604,758	1350,78					2,560	1327,33	362,159	1375,85
1,741	1287,25	544,098	1397,52					2,570	1350,45	318,175	1387,43
1,751	1388,92	626,575	1523,71					2,580	1301,6	261,896	1327,69
1,761	1339,55	667,259	1496,54					2,590	1403,7	362,124	1449,66
1,771	1377,64	601,399	1503,19					2,600	1374,38	284,043	1403,42
1,781	1350,05	616,695	1484,23					2,610	1504,92	301,922	1534,91
1,791	1450,8	578,241	1561,79					2,620	1448,73	224,886	1466,08
1,801	1439,94	600,676	1560,2					2,630	1617,35	183,005	1627,67
1,811	1539,42	557,236	1637,17					2,640	1779,59	128,801	1784,25
1,821	1488,63	477,982	1563,49					2,650	1847,43	115,501	1851,04

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
1,831	1743,73	558,899	1831,11					2,660	2008,19	62,9454	2009,18
1,841	1756,7	609,125	1859,31					2,670	2079,14	59,1389	2079,98
1,851	1858,48	603,729	1954,08					2,680	2114,47	18,6487	2114,55
1,861	1915,7	553,936	1994,18					2,690	2103,8	45,6373	2104,29
1,871	1937,47	577,305	2021,65					2,700	2180,92	65,8536	2181,91
1,881	2085,79	486,53	2141,78					2,710	2176,5	103,097	2178,94
1,891	2082,5	530,333	2148,97					2,720	2221,7	50,8157	2222,28
1,901	2247,06	493,253	2300,56					2,730	2173,95	123,053	2177,43
1,911	2266,63	532,413	2328,32					2,740	2208	127,184	2211,66
1,921	2409,58	475,277	2456,01					2,750	2223,69	82,801	2225,23
1,931	2406,1	488,096	2455,11					2,760	2186,74	46,4535	2187,23
1,941	2462,56	434,956	2500,68					2,770	2203,25	4,82971	2203,26
1,951	2511,53	423,218	2546,94					2,780	2175,16	36,0982	2175,46
1,961	2518,59	447,313	2558					2,790	2061,45	50,2545	2062,06
1,971	2558,96	430,189	2594,87					2,800	1845,48	144,764	1851,15
1,981	2582,49	408,329	2614,57					2,810	1499,06	234,331	1517,26
1,991	2584,67	434,103	2620,87					2,820	1327,72	261,706	1353,27
2,001	2540,08	387,204	2569,42					2,830	1458,32	291,518	1487,17
2,011	2589,32	424,353	2623,86					2,840	1151,4	208,89	1170,2
2,021	2585,12	473,198	2628,07					2,850	1158,71	252,229	1185,84
2,031	2571,04	340,125	2593,44					2,860	1035,08	263,654	1068,13
2,041	2570	347,775	2593,42					2,870	1045,05	210,948	1066,13
2,051	2420	420,447	2456,25					2,880	1051,89	301,872	1094,35
2,061	2584,38	390,874	2613,77					2,890	903,764	303,951	953,507

Передній кут $\gamma=0^\circ$				Передній кут $\gamma=5^\circ$				Передній кут $\gamma=15^\circ$			
τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н	τ , мс	Load X,Н	Load Y,Н	Σ , Н
2,071	2534,59	391,404	2564,63					2,900	1032,5	372,276	1097,56
2,081	2626,15	458,786	2665,92					2,910	1155,94	264,261	1185,76
2,091	2554,52	449,225	2593,72					2,920	1033,59	243,132	1061,8
2,101	2568,88	389,231	2598,2					2,930	1003,74	284,537	1043,29
2,111	2551,04	424,121	2586,06					2,940	1036,72	382,958	1105,19
2,121	2192,62	552,672	2261,2					2,950	1067,91	276,807	1103,2
2,131	1927,89	541,86	2002,59					2,960	1038,73	279,752	1075,74
2,141	1988,72	525,98	2057,1					2,970	1028,09	399,745	1103,07
2,151	1600,09	563,696	1696,48					2,980	1080,83	397,344	1151,55
2,161	1660,94	505,3	1736,1					2,990	1069,32	342,934	1122,96
2,171	1467,09	500,259	1550,04					3,000	1117,42	290,788	1154,64
2,181	1227,98	481,695	1319,08					3,010	1147,51	349,575	1199,58
2,191	1189,47	476,101	1281,21					3,020	1125,96	350,646	1179,3
2,201	1042,57	548,085	1177,86					3,030	1133,94	363,317	1190,72
2,211	1007,23	497,283	1123,3					3,040	1266,61	391,575	1325,76
2,221	978,985	549,095	1122,46					3,050	1131,26	277,984	1164,91
2,231	1107,06	529,157	1227,02					3,060	1345,23	374,243	1396,32
2,241	1089,4	480,27	1190,57					3,070	1324,56	232,156	1344,75
2,251	1085,67	508,997	1199,07					3,080	1447,72	304,48	1479,39
2,261	1089,84	538,831	1215,77					3,090	1447,56	358,188	1491,22
2,281	1132,66	557,125	1262,26					3,100	1574,48	266,144	1596,82

ДОДАТОК Д

Результати імітаційно-реологічного моделювання та аналіз впливу технологічних чинників на формування залишкових напружень I роду при лезовому обробленні (торцевому фрезеруванні) деталей з сплавів IN718, Ti6AL4V та AL 6061 в системі Deform2D

Нижче наведений приклад реологічного 2D моделювання лезового оброблення (торцевого фрезерування) деталі з сплаву IN718 в системі Deform2D.

Рекомендовані геометричні параметри заточування для пластинок R300-1032E-PL S30T для фрез CoroMill 300- $\gamma = 0-8^\circ$, $\alpha = 12-15^\circ$.

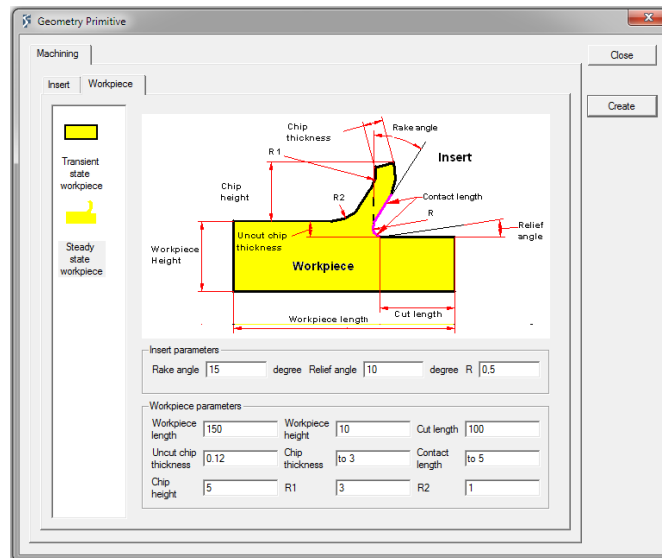


Рис.Д.1. Формування геометричних примітивів різального інструменту та заготовки в системі Deform 2D

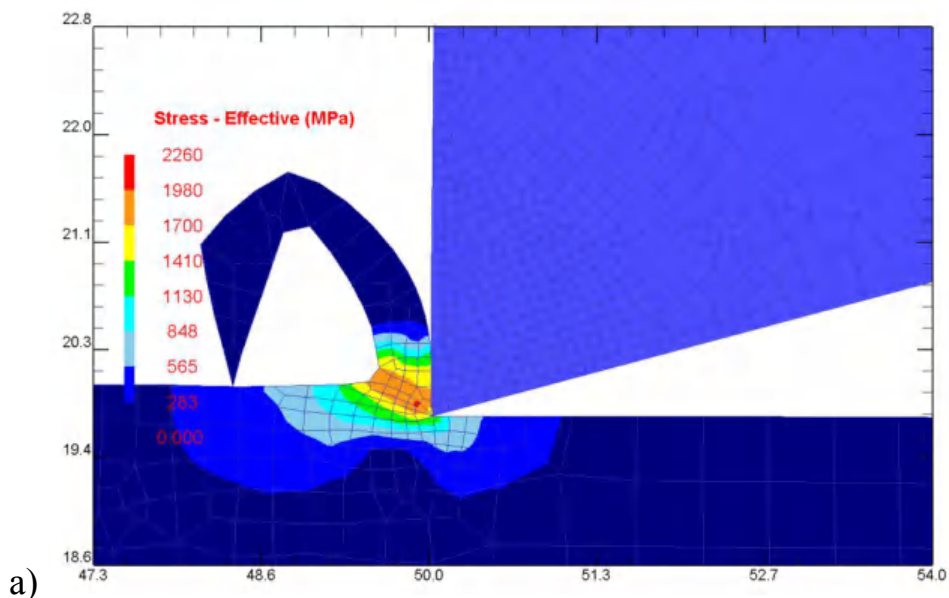
В моделі, реалізованій в системі Deform-2D, використовуємо:

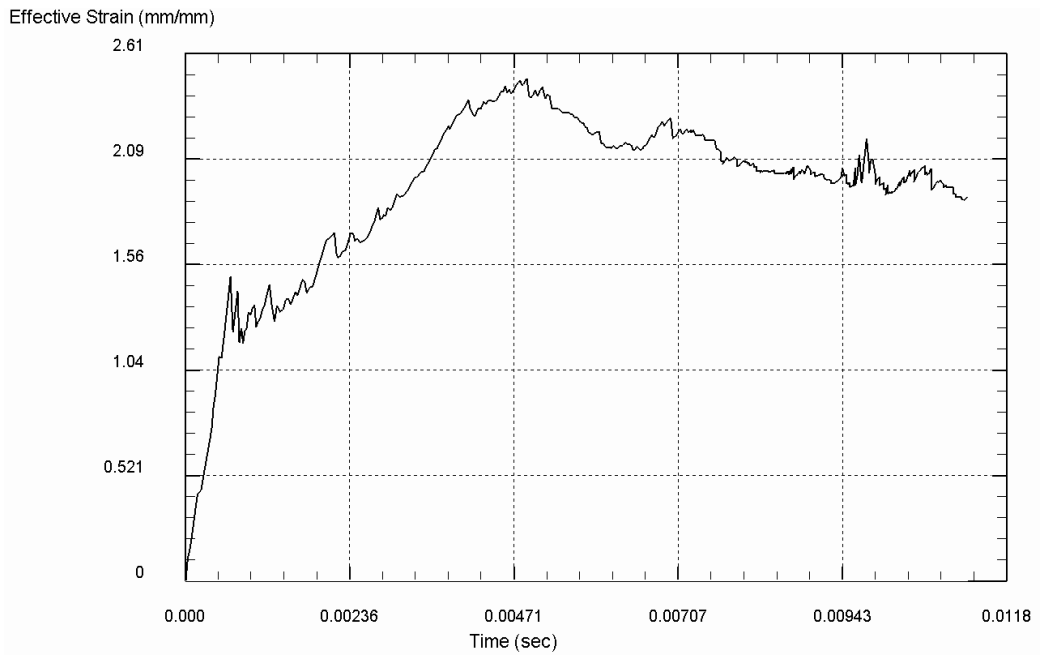
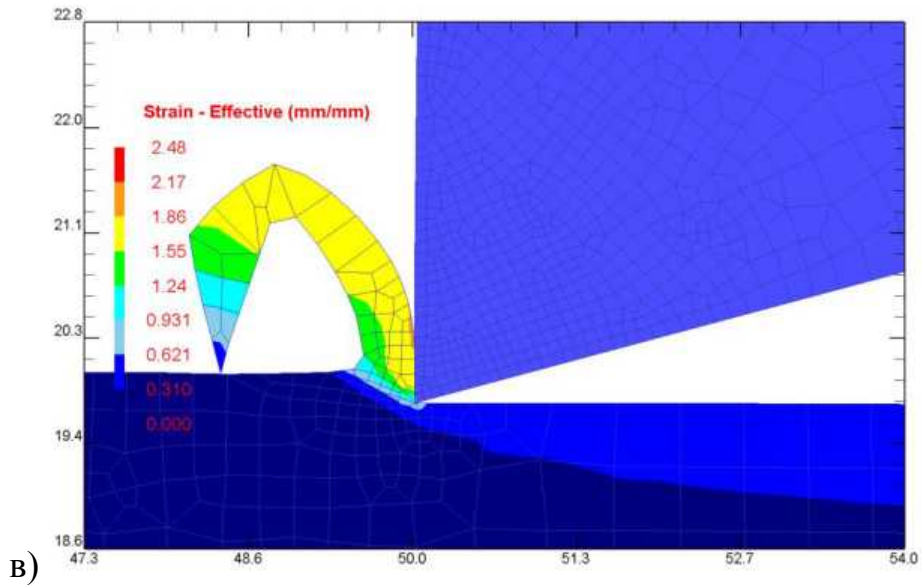
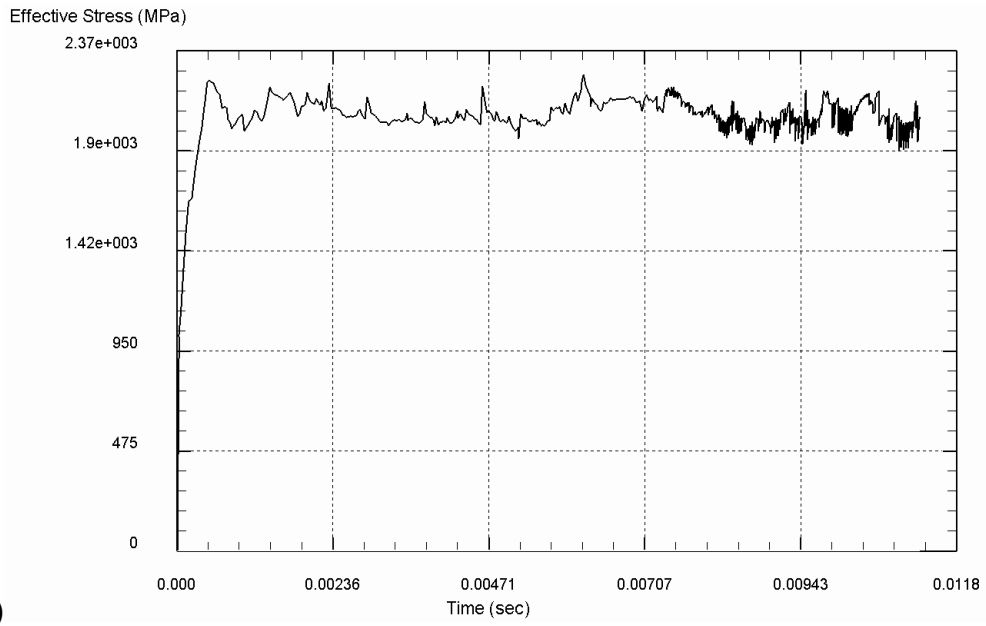
- тип моделювання – Lagrangian Incremental (Аналіз Лагранжа) з градієнтною сіткою (коефіцієнт розрідження - 0,1);
- приведена геометрія об'єкта моделювання – Plane Strain;
- тип об'єктів моделювання : заготовка – Elasto-Plastic; інструмент – Rigid;
- метод рішення ітераційних задач – Newton-Raphson (метод Ньютона-

Рафсена);

- умова збіжності розрахунку – Conjugate-Gradient Solver (метод об'єднаного градієнта);
- умова текучості матеріалу – Generalized Johnson&Cook Model (узагальнена модель Джонсона-Кука (рис.2));
- критерій руйнування – Rice&Tracy Fracture (нормалізований енергетичний критерій Райса-Трейсі)
- модель структурно-фазових перетворень – Avrami model (модель Аврамі);

Результати імітаційного реологічного моделювання для фрезерування сплаву IN 718 фрезами CoroMill 300 - $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 12-15$ наведені на рис.Д2.





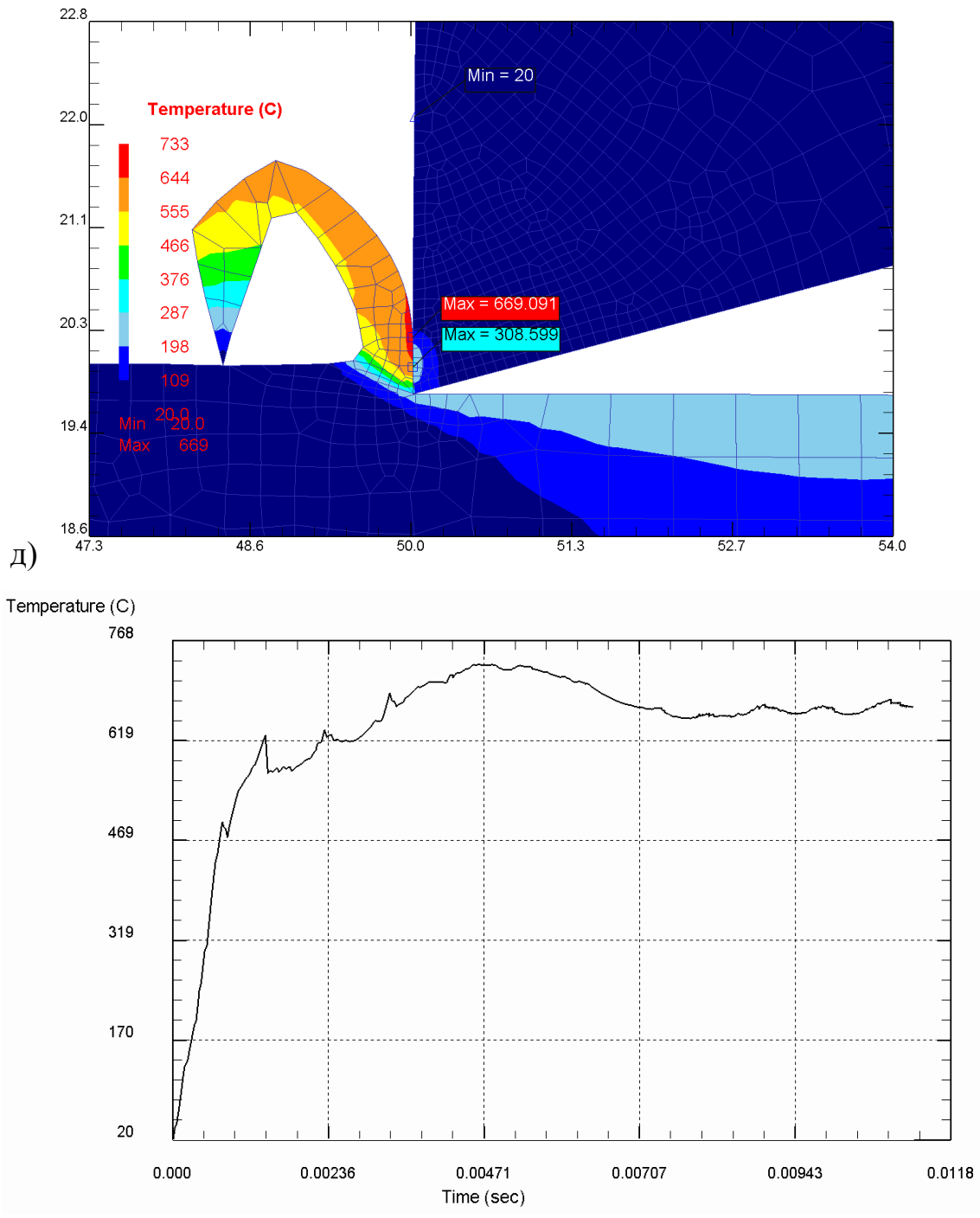


Рис.Д2. Результати реологічного моделювання процесу фрезерування деталі (матеріал заготовки - сплаву IN 718) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв) а-б – еквівалентне напруження; в-г – приведені деформації; д-е - температура в зоні різання;

На рис.Д3. наведена реологічна картина 2D моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сплаву IN 718 фрезою CoroMill 300 з для

пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв). Загальний шлях інструменту розділений на 16 діапазонів вимірювань з метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ напружено-деформаційної складової післядії процесу оброблення.

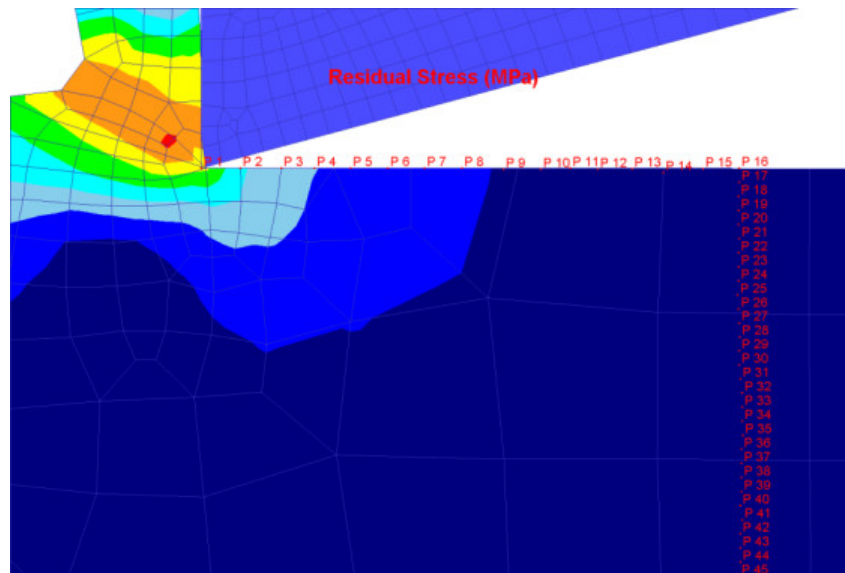


Рис.Д3. Розрахункова схема для визначення залишкових напружень при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сплаву IN 718) фрезею CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв)

В результаті реологічного моделювання можна встановити величини залишкових напружень ($\pm\sigma_s$), глибину їх залягання і закон розподілу. Очевидно, що в межах вирішення даної задачі будуть моделюватись тільки термодформаційні залишкові напруження I роду.

На рис.Д4 наведена картина реологічного моделювання залишкових напружень при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сплаву IN 718) фрезею CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв). Ці напруження експотенційно зменшуються в результаті термодинамічної релаксації із зростанням віддалі від вершини різального клину вздовж обробленої поверхні. Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно 150 МПа при обробленні деталі з сплаву IN 718

фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв).

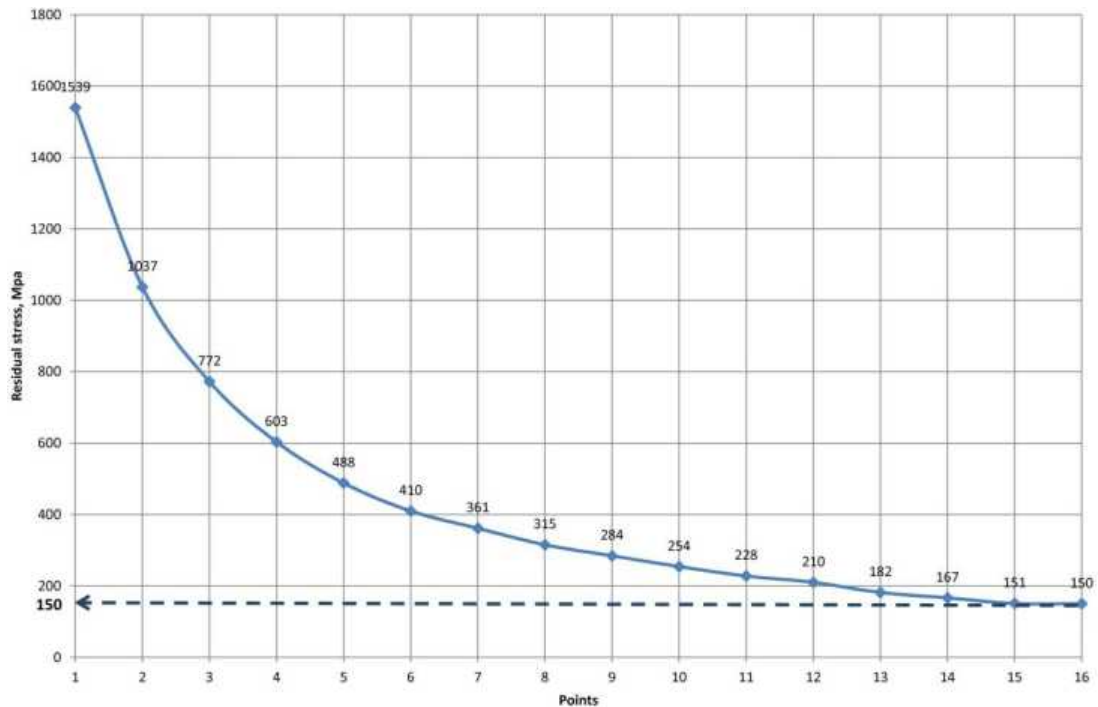


Рис.Д4. Графічні залежності залишкових напружень I роду, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сплаву IN 718 фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв)

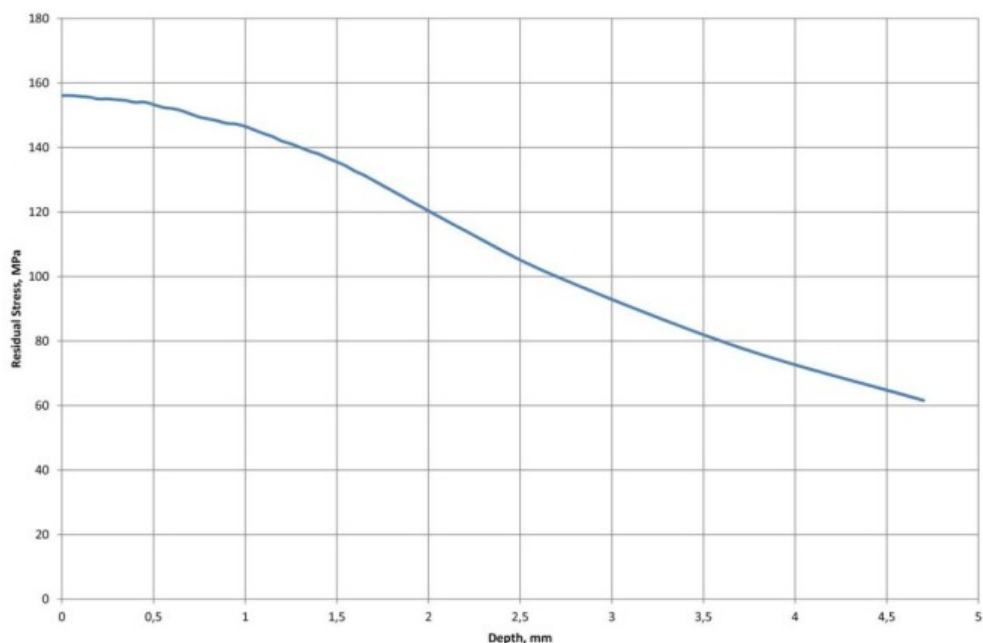
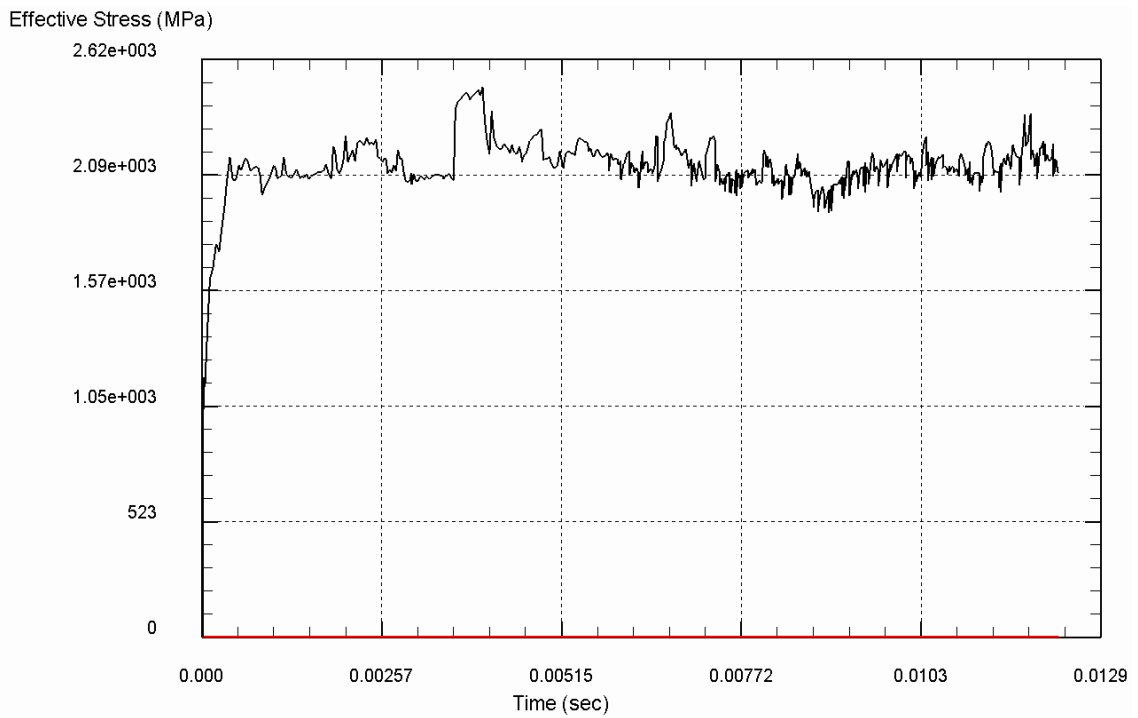
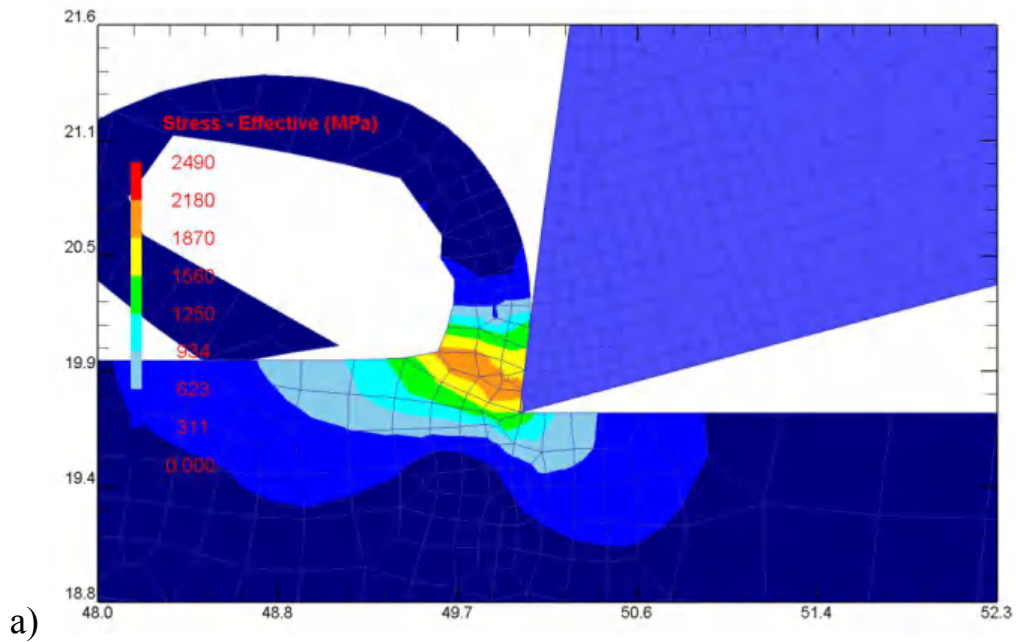
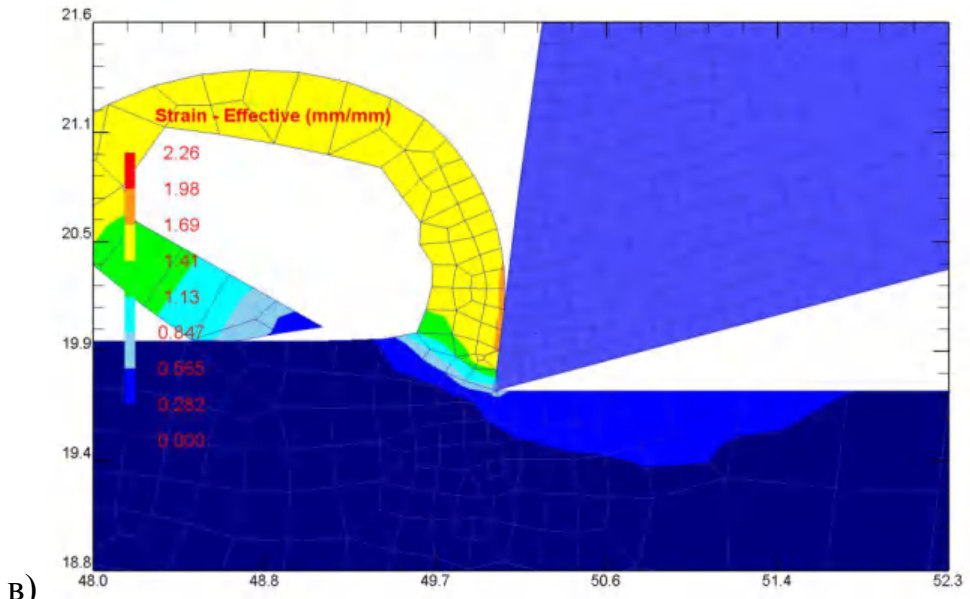


Рис.Д5 Графічні залежності глибини залягання залишкових напружень I роду, отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сплаву IN 718 фрезою CoroMill 300 з

пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв)

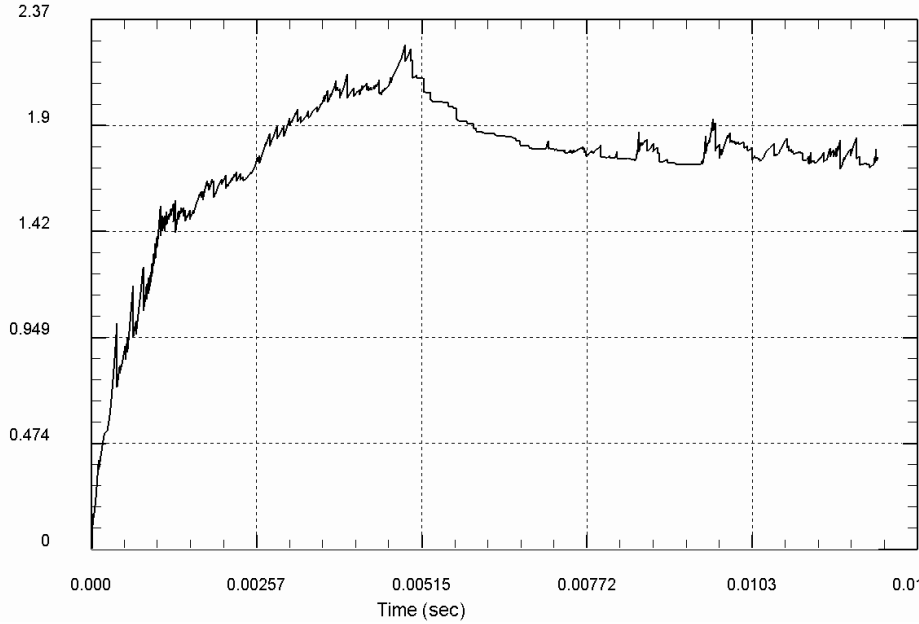
Результати імітаційного реологічного моделювання для фрезерування сплаву IN 718 фрезами CoroMill 300 - $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 12-15^\circ$ наведені на рис.Дб.





B)

Effective Strain (mm/mm)



Γ)

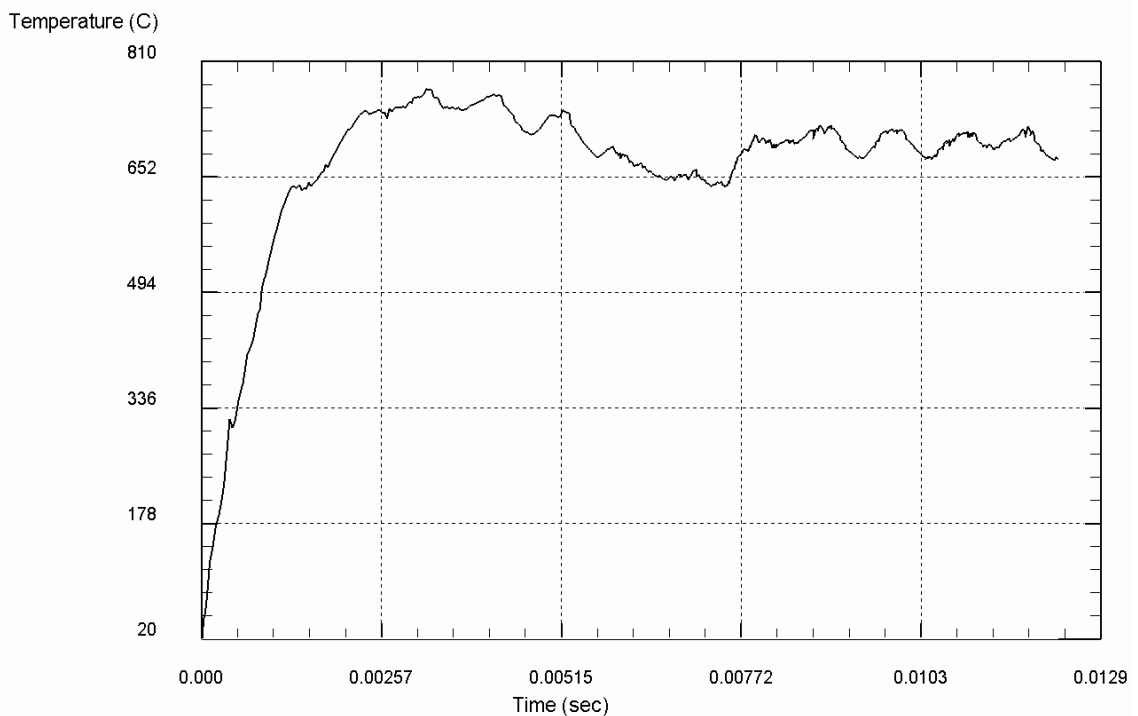
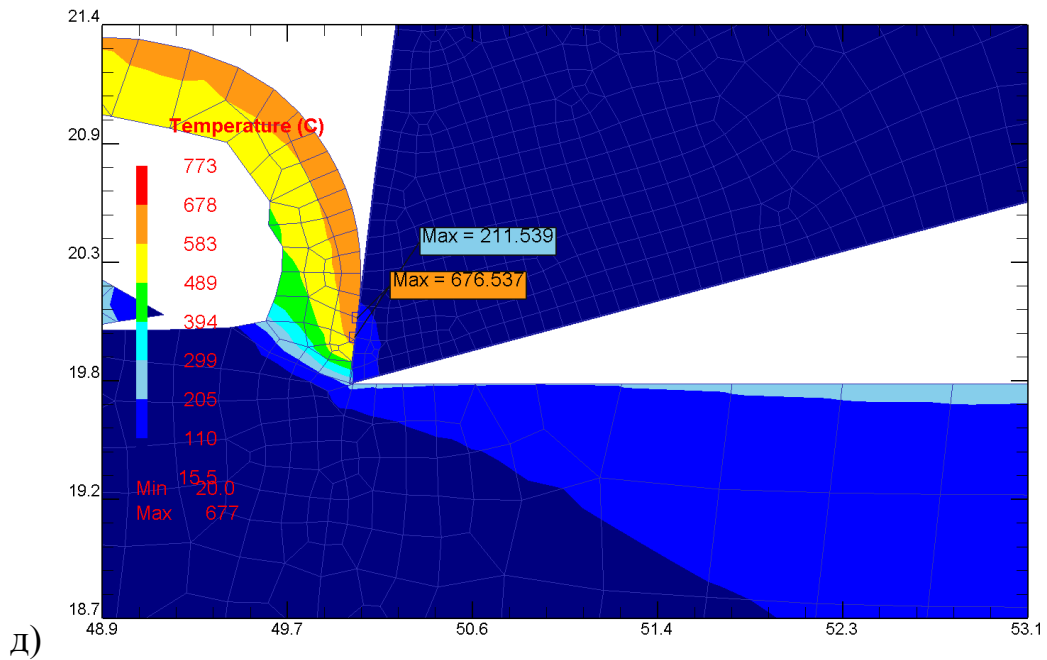


Рис.Д6 Результати реологічного моделювання процесу фрезерування деталі (матеріал заготовки - сплаву IN 718) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв) а-б – еквівалентне напруження; в-г – приведені деформації; д-е - температура в зоні різання;

Загальний шлях інструменту, як і у попередньому випадку розділений на 16 діапазонів вимірювань з метою аналізу динаміки затухання та прояву

незворотних залишкових явищ напружено-деформаційної складової післядії процесу оброблення.

На рис.8 наведена картина реологічного моделювання залишкових напружень при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сплаву IN 718) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв).

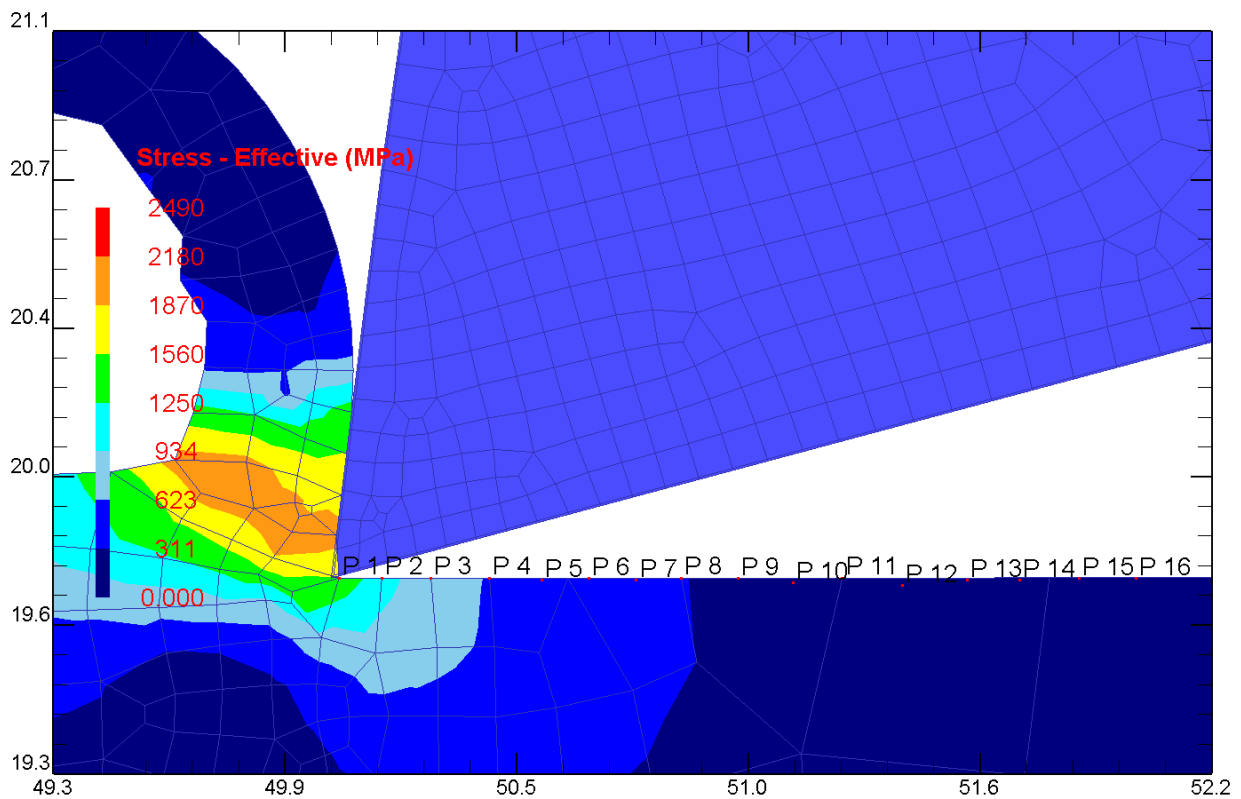


Рис.Д7. Розрахункова схема для визначення залишкових напружень при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сплаву IN 718) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв)

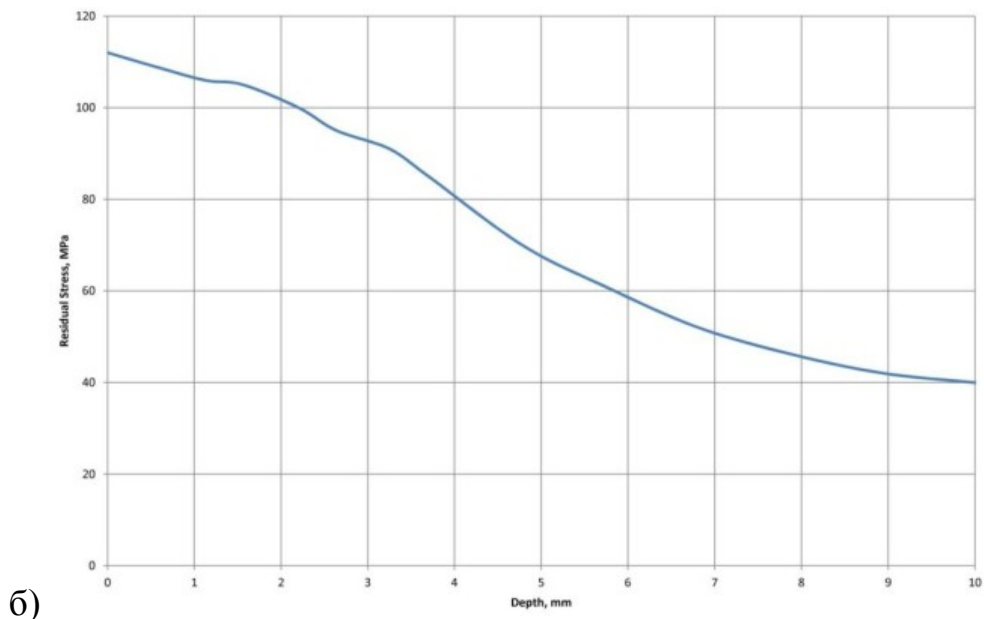
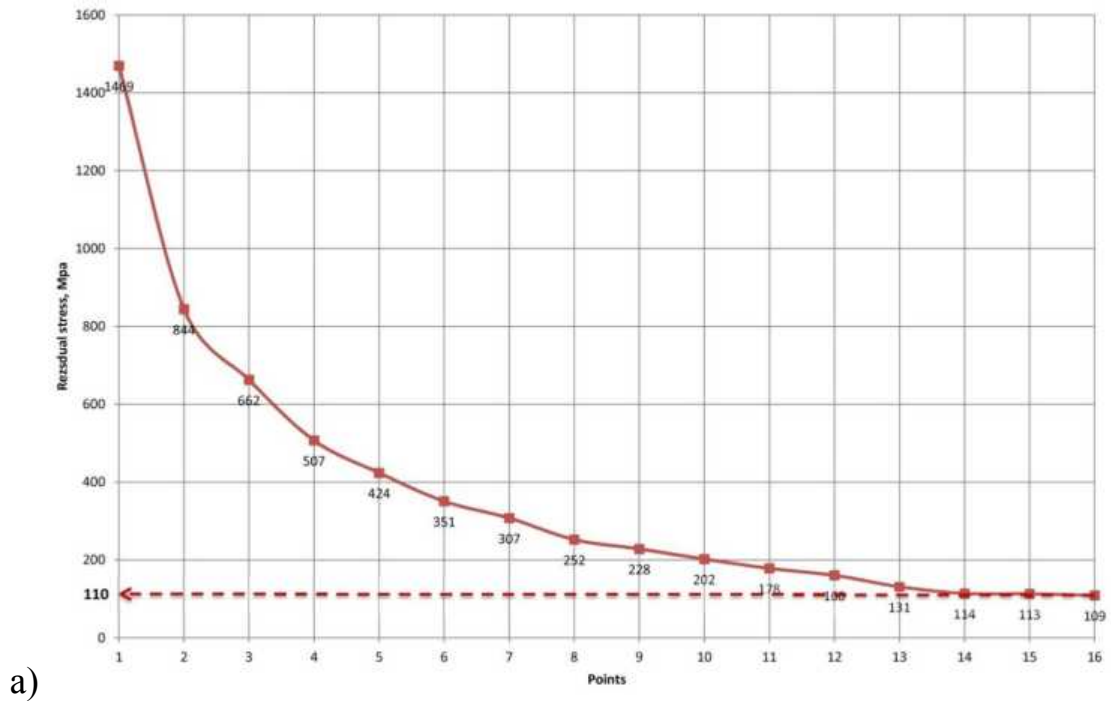


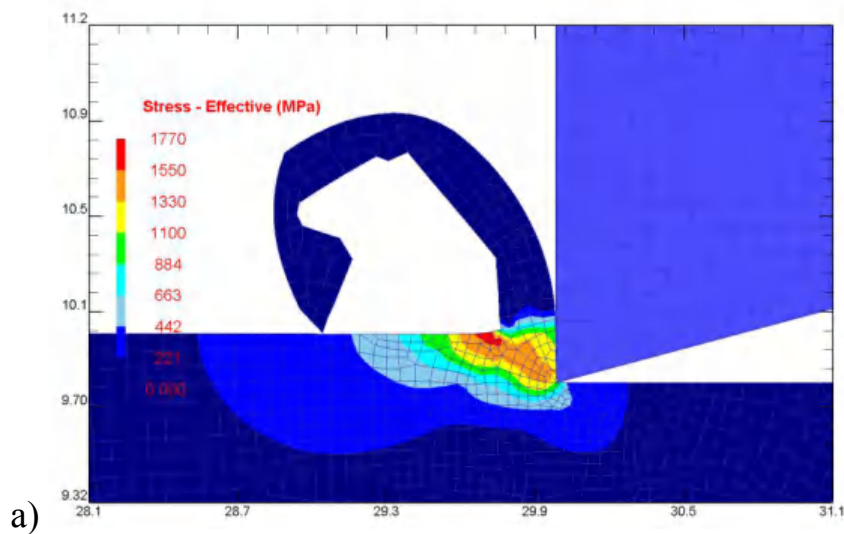
Рис.Д8. Графічні залежності залишкових напружень I роду на поверхні (а) та по глибині залягання (б), отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сплаву IN 718 фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв)

Крива залишкових напружень I роду (рис.Д8) відображає інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (температурних та фрикційних)

та стискаючих (силових) навантажень. Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (при температурі близько 100°C) складатиме приблизно 110 МПа при обробленні деталі з сплаву IN 718 фрезою CoroMill 300 з дая пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,12$ мм; $t=0,25$ мм; $V=40$ м/хв).

Результати імітаційного реологічного моделювання для фрезерування титанового сплаву ТІ6АL4V фрезами CoroMill 300 - $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ наведені на рис.Д9.

Загальний шлях інструменту, як і у попередньому випадку розділений на 16 діапазонів вимірювань з метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ напружено-деформаційної складової післядії процесу оброблення.



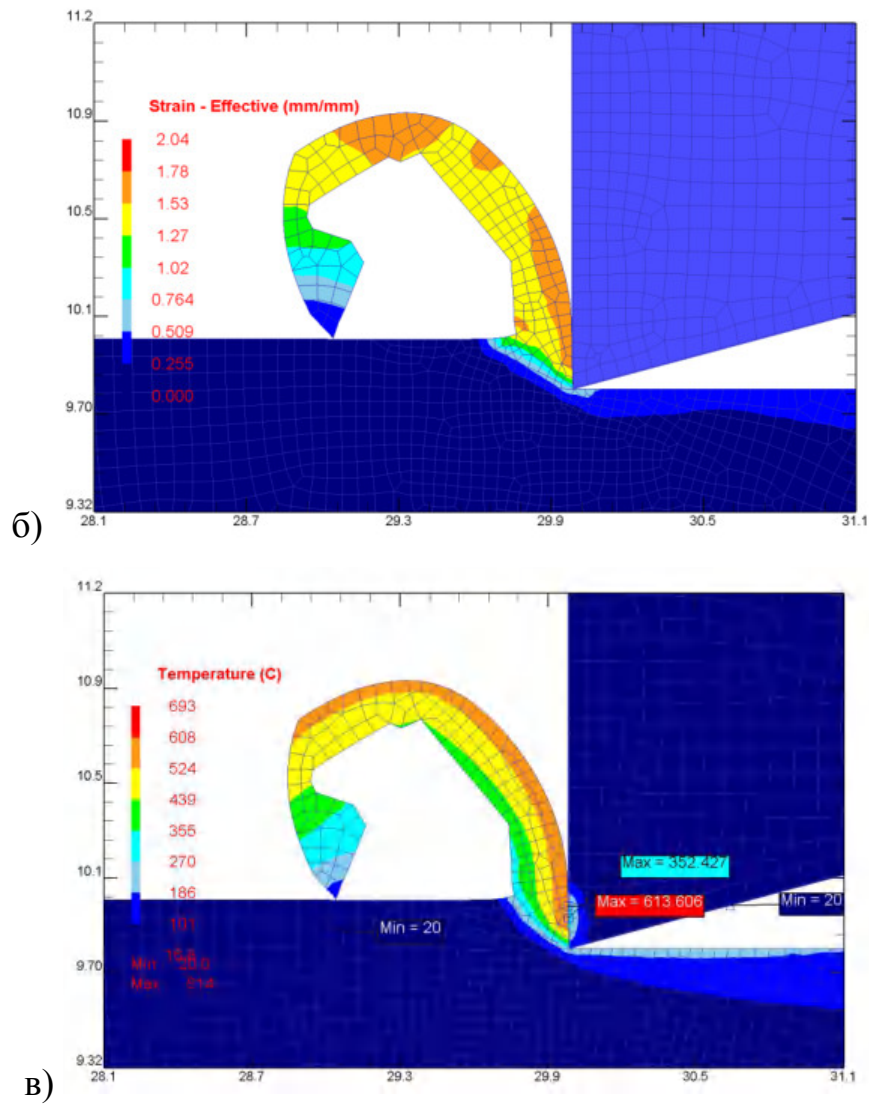


Рис.Д9 Результати реологічного моделювання процесу фрезерування деталі (матеріал заготовки - сплаву Тi6AL4V) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,07 мм; t=0,2 мм; V=115 м/хв)
а – еквівалентне напруження; б – приведені деформації; в- температура в зоні різання;

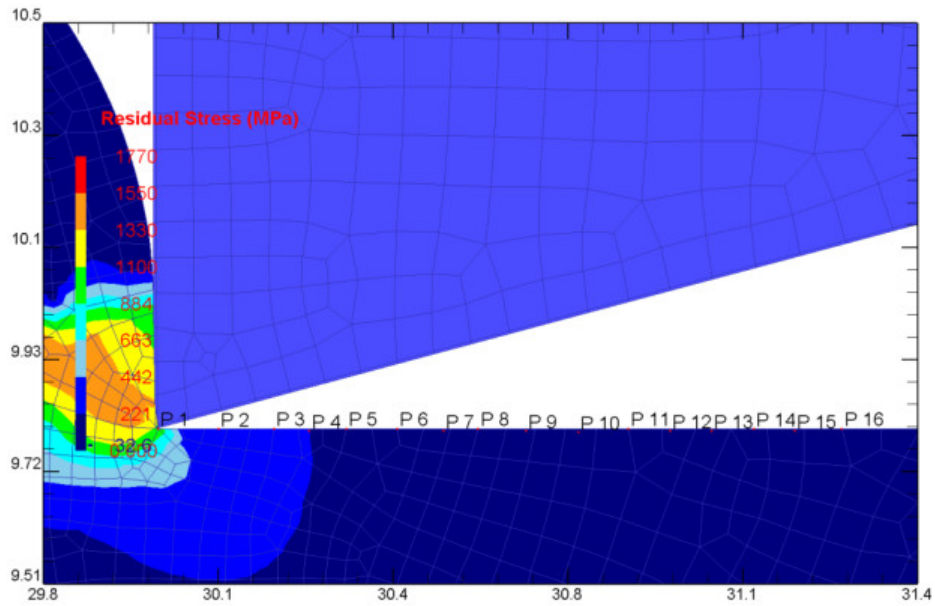
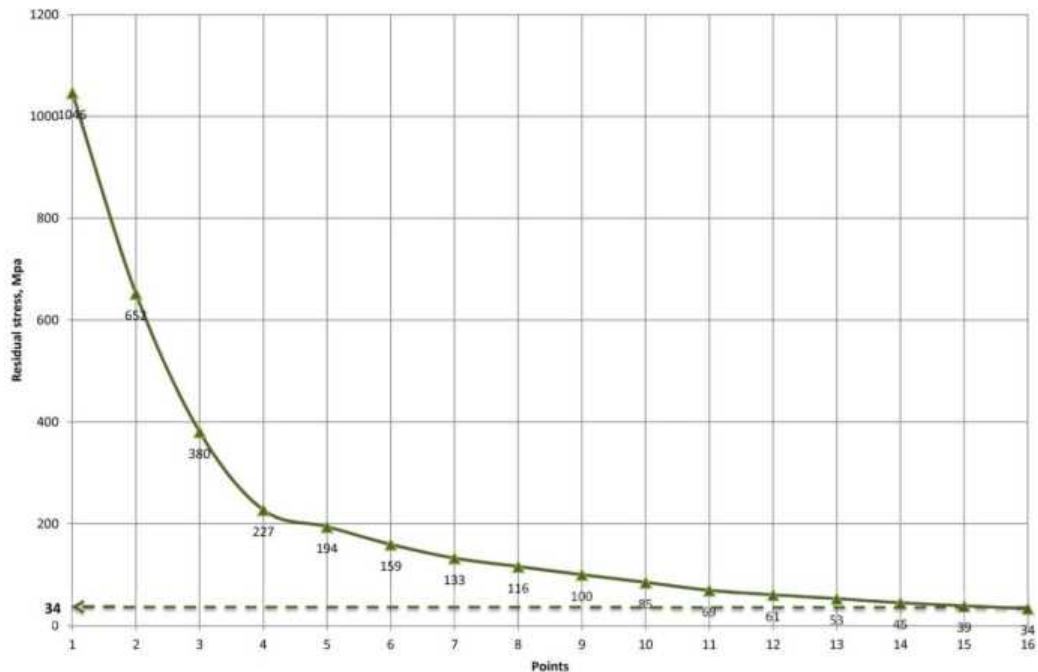


Рис.Д.10. Розрахункова схема для визначення залишкових напружень при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сплав ТІ6АL4V) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,07 мм; t=0,2 мм; V=115 м/хв)

На рис.Д.11 наведена картина реологічного моделювання залишкових напружень при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сплав ТІ6АL4V) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,07 мм; t=0,2 мм; V=115 м/хв)



а)

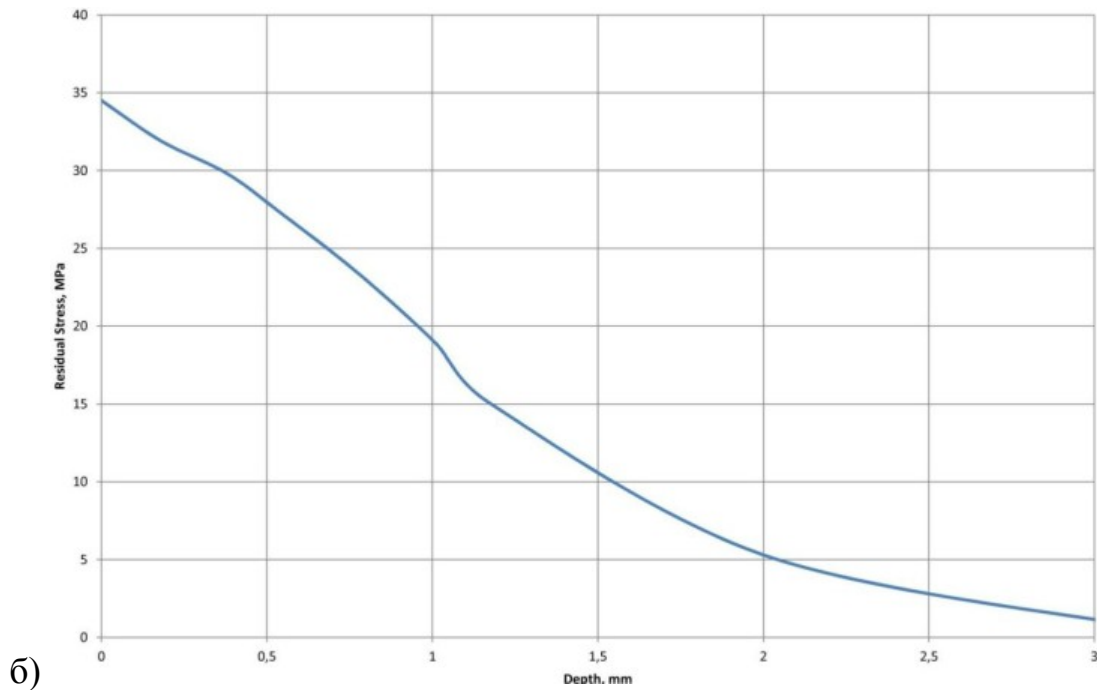
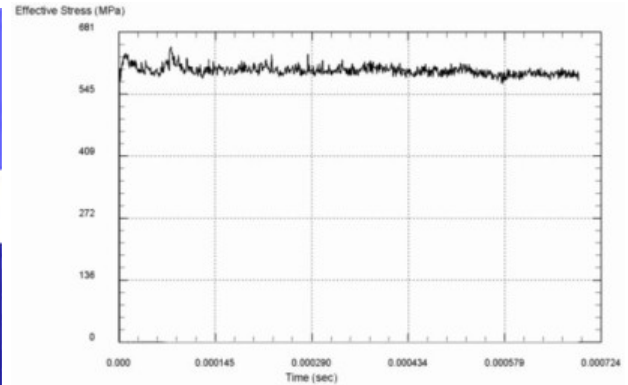
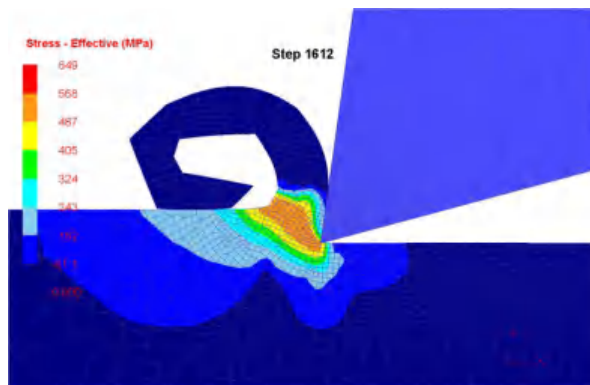


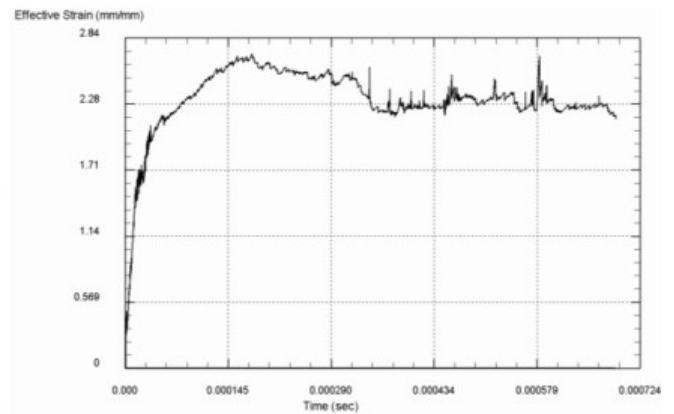
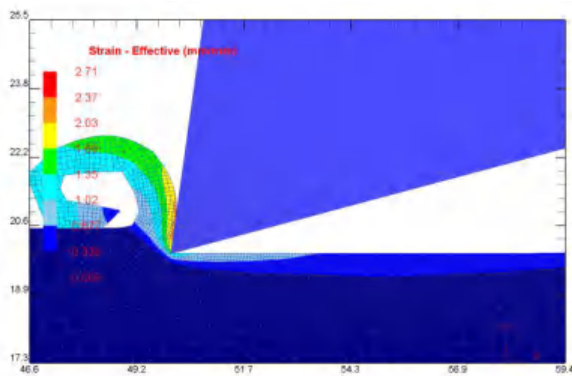
Рис.Д.11. Графічні залежності залишкових напружень I роду на поверхні деталі (а) та по глибині залягання (б), отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сплаву ТІ6АL4V фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,07$ мм; $t=0,25$ мм; $V=115$ м/хв)

Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації складатиме приблизно 32-34 МПа при обробленні деталі з титанового сплаву ТІ6АL4V фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ ($S=0,07$ мм; $t=0,2$ мм; $V=115$ м/хв).

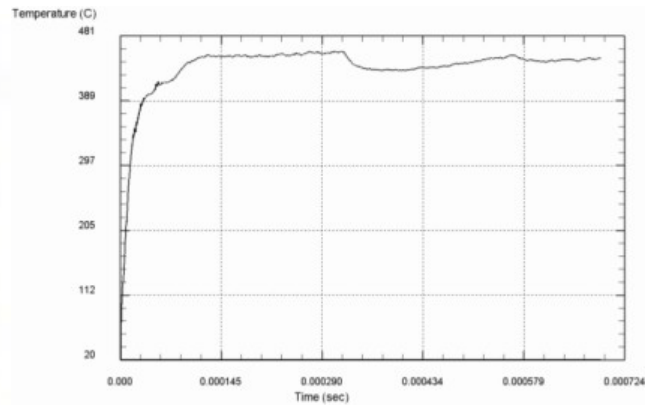
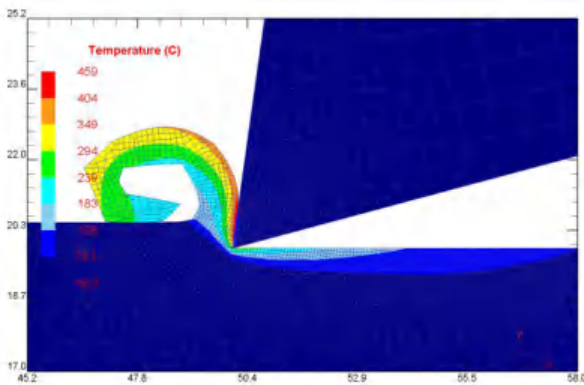
Результати імітаційного реологічного моделювання для фрезерування деталі з алюмінієвого сплаву AL 6061 фрезами CoroMill 300 - $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ наведені на рис.Д12.



а)



б)



в)

Рис.12 Результати реологічного моделювання процесу фрезерування деталі (матеріал заготовки - сплав AL 6061) фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,1 мм; t=0,5 мм; V=800 м/хв)
а – еквівалентне напруження; б – приведені деформації; в- температура в зоні різання;

Загальний шлях інструменту, як і у попередньому випадку розділений на 41 діапазон вимірювань (21 – на поверхні заготовки і 20 – вглиб заготовки (через 0,25 мм) в зоні термостабілізації) з метою аналізу динаміки затухання та прояву незворотних залишкових явищ напружено-деформаційної складової післядії процесу оброблення.

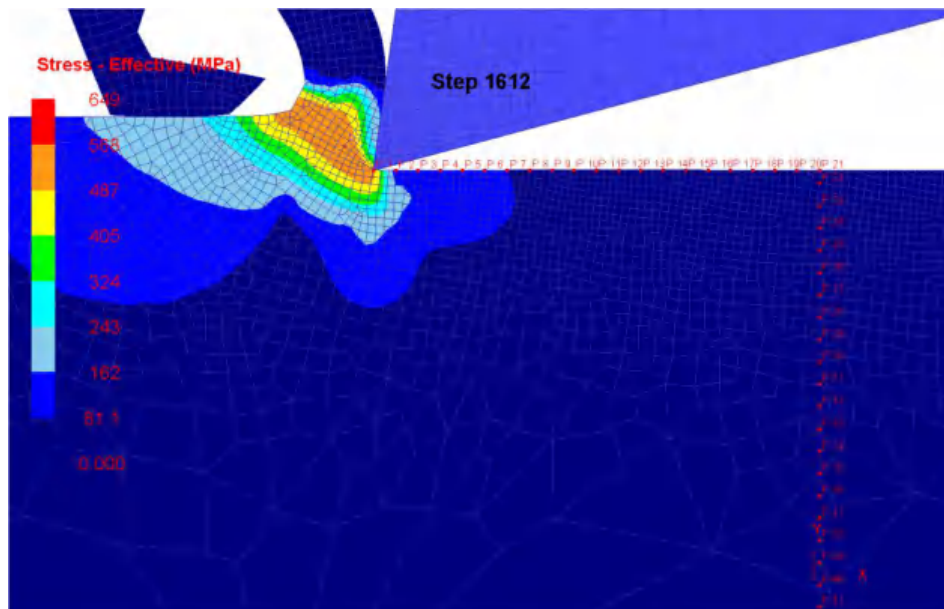


Рис.Д.13. Розрахункова схема для визначення залишкових напружень при фрезеруванні деталі (матеріал заготовки - сплав AL 6061) фрезою CoroMill 300 з пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,1 мм; t=0,5 мм; V=800 м/хв)

На рис.Д14 наведена картина реологічного моделювання залишкових напружень при фрезеруванні деталі з сплаву AL 6061 фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,1 мм; t=0,5 мм; V=800 м/хв)

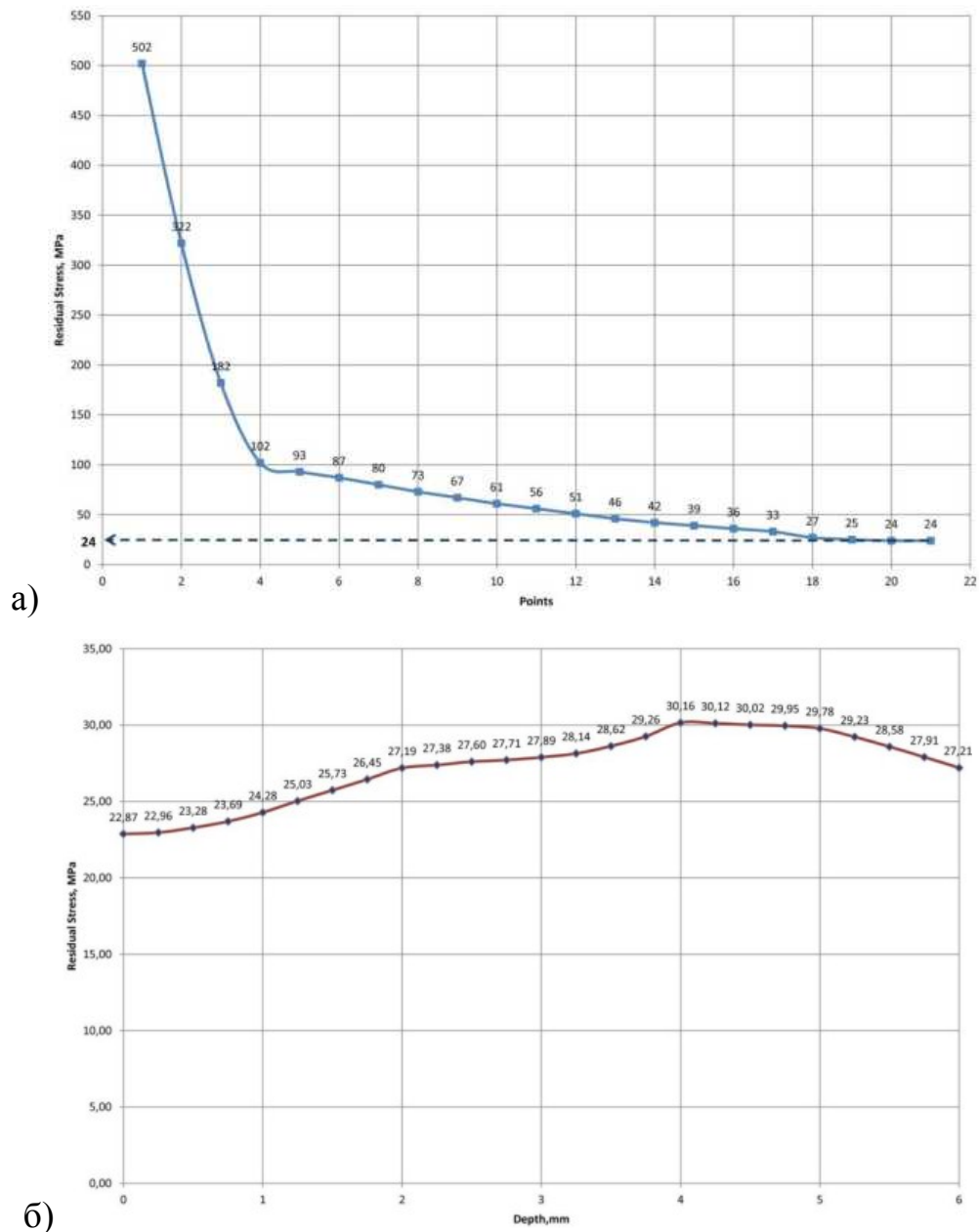


Рис.14. Графічні залежності залишкових напружень I роду на поверхні деталі (а) та по глибині залягання (б), отримані в результаті реологічного моделювання технологічного переходу фрезерування деталі з сплаву AL 6061 фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,1 мм; t=0,5 мм; V=800 м/хв)

Середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації складатиме приблизно 24 МПа при обробленні деталі з алюмінієвого сплаву AL 6061 фрезою CoroMill 300 з для пластинкою R300-1032E-PL S30T $\gamma = 8^\circ$, $\alpha = 15^\circ$ (S=0,1 мм; t=0,5 мм; V=800 м/хв).

ДОДАТОК Е

Методика експериментального визначення напружень акустопружним методом в зразках виготовлених з алюмінієвого сплаву AL 6061.

1. Методика досліджень.

Залишкові напруження визначались з допомогою акустопружного методу, який полягає в зміні швидкості ультразвукових хвиль під дією механічних напружень. Для визначення напружень використовувались релєївські поверхневі акустичні хвилі (ПАХ). Ці хвилі поширюються по поверхні зразка в шарі товщиною 1-2 Λ (де Λ – довжина ПАХ). При дослідженні використовувались хвилі частотою 3 МГц, що відповідає $\Lambda=1$ мм. Схема вимірювань показана на рис.1. Визначався час проходження акустичної хвилі між збуджуючим та реєструючим перетворювачами. Відстань між перетворювачами становила 15 мм. Похибка визначення швидкості становила менше 0.05%.

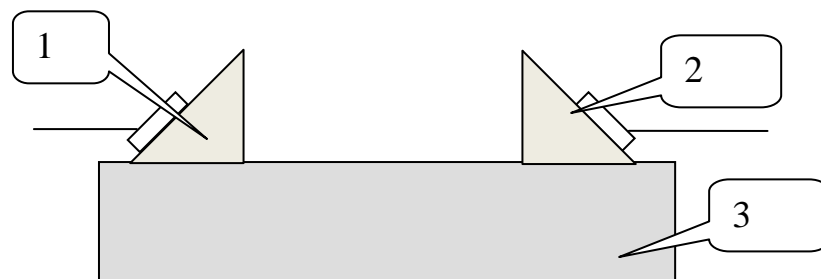


Рис. 1. Схема вимірювання швидкості поширення поверхневих акустичних хвиль: 1-збуджуючий перетворювач, 2-реєструючий перетворювач, 3-зразок.

При дослідженні приймалось, що напруження лежать в площині зразка, тобто мають двохмірний характер. Напруження можна визначити з виразів

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_1}{V_1} &= \beta_1 \sigma_{11} + \beta_2 \sigma_{22}; \\ \frac{\Delta V_2}{V_2} &= \beta_2 \sigma_{11} + \beta_1 \sigma_{22}; \end{aligned} \quad (1)$$

де V_1 і V_2 – швидкості ПАХ, які поширюються в напрямках 1(X) і 2 (Y); ΔV_1 і ΔV_2 – зміна відповідних швидкостей під дією механічних напружень; σ_{11} , σ_{22} – компоненти тензора залишкових механічних напружень; β_1 , β_2 – акустопружні коефіцієнти.

У випадку, коли напруження є одновісним його можна знайти з виразу:

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \beta_1 \sigma_{11}; \quad (2)$$

Для визначення напружень необхідно знати акустопружні коефіцієнти β_1 , β_2 . Їх можна визначити експериментально, або скористатись літературними даними. В нашому випадку було використано значення $\sigma_{11} = 0.4\%/100\text{MPa}$ яке взяте з літератури і стосується алюмінію.

Методика вимірювання напружень полягає у вимірюванні швидкості в зразку без напружень і в зразку з напруженнями. Різниця швидкості дозволяє визначити напруження згідно виразів (1) чи (2). Було використано два способи оцінки залишкових напружень. Перший полягав у нагріванні зразка до високих температура, що приводить до суттєвого зменшення напружень. Другий ґрунтувався на тому, що поблизу краю зразка напруження є суттєво менші ніж в середній його частині.

2. Отримані результати.

2.1. Зменшення напружень з допомогою термічної обробки зразка.

Вимірювання провели перед термічною обробкою (початковий стан).

Перший етап нагріву. Зразок витримали при температурі 310°C протягом 2 год., повільно охолодили разом з пічкою до кімнатної температури і провели вимірювання.

Другий етап нагріву. Зразок нагріли до 400°C і витримали при цій температурі 1 год., потім повільно охолодили разом з пічкою. Графік зміни температури представлений на рис.2. При досягненні кімнатної температури провели вимірювання.

Результати представлені в таблицях 1, 2. Зміна швидкості визначалась відносно початкового стану.

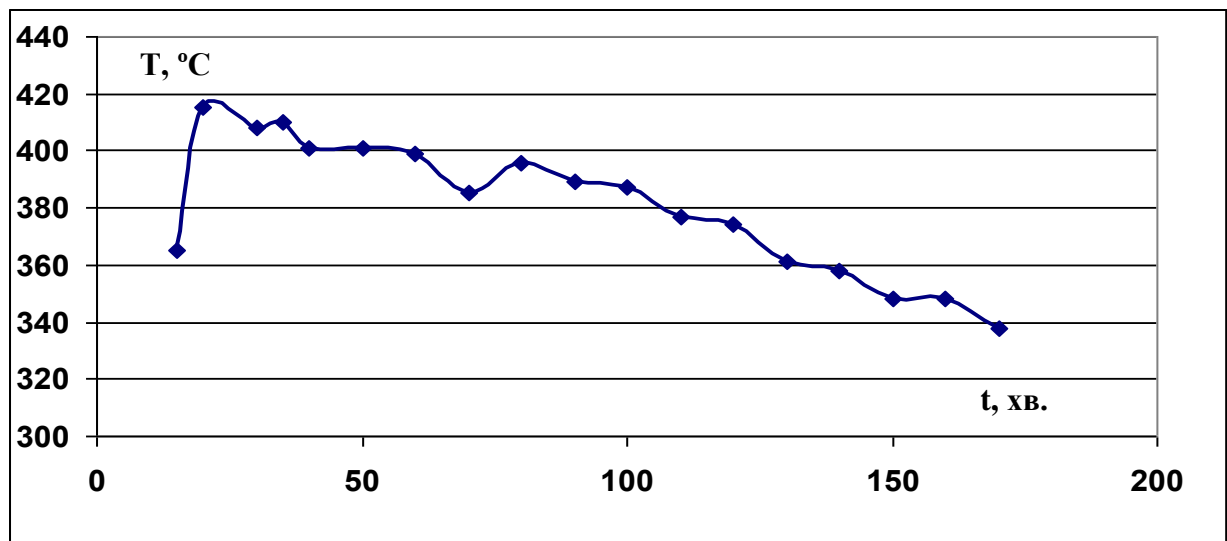


Рис.2 Часова залежність зміни температури при термічній обробці зразка.

Таблиця 1, Дослідження зразок S7 6300

Температура	Швидкість $\Delta V/V$ (%)	Залишкове напруження згідно виразу 1 (МПа)
поч. стан	0	0
310С 2 год	0	0
400С 1год	0.28	70

Таблиця 2, зразок S7 8400

Температура	Швидкість $\Delta V/V$ (%)	Залишкове напруження згідно виразу 1 (МПа)
поч стан	0	0
310С 2 год	0	0
400С 1год	0.24	60

2.2 Оцінка напружень на основі вимірювання швидкості в середині зразка і на краю зразка

Вимірювання проводились в середній частині зразка і на краю зразка. Приймалось, що зміна швидкості пов'язана із зменшенням напружень на

краю зразка. Результати представлені в таблиці 3. Зміна швидкості визначалась відносно середини зразка.

Таблиця 3. Результати досліджень

Зразок	Швидкість $\Delta V/V$ (%)	Залишкове напруження згідно виразу 1 (МПа)
S9 2100	0,04	10
S9 4200	0,13	30
PRZE P 2100	0,08	20
PRZE P 4200	0,2	50
PRZO 6300	0,45	110
PRZO 8400	0,3	80
BEZ 2100	0,09	20
BEZ 4200	0,09	20

3. Використані наближення та припущення.

3.1. Прийнято припущення про одновісне напруження, що є достатньо грубим наближенням. Таке припущення виникло в результаті того, що відомий лише один акустопружний коефіцієнт, причому він відомий для подібного матеріалу. Для коректного визначення напружень необхідно експериментально виміряти акустопружні коефіцієнти, для чого необхідні зразки відповідної форми.

3.2 Зразки були оброблені по різному з двох боків. Напруження, які виникли є результат обробки обох поверхонь і складно розділити впливи обробок різних поверхонь. Більш правильно провести експеримент, коли зразок оброблений з одного боку.

ДОДАТОК 3.

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



**ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН УКРОБОРОНПРОМ УКРАЇНИ
ДП „ЗАКАРПАТСЬКЕ ВЕРТОЛІТНЕ ВИРОБНИЧЕ
ОБ'ЄДНАННЯ”**

90531, Закарпатська обл., Тячівський р-н, смт. Дубове, вул. Заводська, 8 тел./факс: (03134) 7-22-65, 7-25-08

<p>* Україна *</p> <p>90531, Закарпатська обл., Тячівський р-н смт Дубове, вул. Заводська, 8</p> <p>ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ЗАКАРПАТСЬКЕ ВЕРТОЛІТНЕ ВИРОБНИЧЕ ОБ'ЄДНАННЯ»</p> <p>Р/р 26002053901220 в КБ «Приватбанк» м. Ужгород, МФО 312378, код ЄДРПОУ 14310804 Код пл. ПДВ 143108007130, св. №10647898</p> <p>№ <u>37</u> від <u>5</u> <u>06</u> 20<u>15</u>р.</p>



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
Державного підприємства
«Закарпатське вертолітне виробниче
об'єднання» Дзябло І.І.

« 5 » червня 2015 р.

АКТ

**ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДОКТОРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУПНИЦЬКОГО ВАДИМА ВОЛОДИМИРОВИЧА**

Комісія у складі:

голова комісії	Головний інженер	Папушак М.Я.
члени комісії:	Головний бухгалтер	Черво Г.Ю.
	Начальник виробництва	Бабич В.С.

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи "Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу", автор - Ступницький Вадим Володимирович, представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, використані в діяльності конструкторсько-технологічного відділу Державного підприємства «Закарпатське вертолітне виробниче об'єднання» шляхом впровадження:

1. Методик оптимізації режимів різання виробів авіаційної техніки з титаномістких сплавів.
 2. Методик моделювання параметрів втомної міцності деталей параболічних антен великого діаметру в системах MicroCAE
 3. Рекомендацій щодо зміни структури технологічних процесів на викінчувальних операціях механічного оброблення – зокрема заміни операцій круглого шліфування гартованих поверхонь деталей на операції токарного оброблення лезовим інструментом на основі полікристалічного кубічного нітриду бору (CBN) з керамічним покриттям (ріжучі пластини Wiper - Sandvik Coromant з геометріями -WH і -WG)
- Використання зазначених результатів дозволяє: підвищити якість технологічного проектування та ефективність роботи конструкторсько-технологічного відділу; підвищити продуктивність праці при операціях механічного оброблення в середньому на 12%; зменшити залишкові напруження та деформації функціональних поверхонь виробів авіаційної техніки на 35-40%.

Голова комісії

Члени комісії:

Папушак М.Я.

Черво Г.Ю.

Бабич В.С.



Товариство з обмеженою відповідальністю
«ІнтерПЕТ»
 79056 м. Львів, вул. Гайдучка, 5
 код ЄДРПОУ 30492103
 тел./факс (032) 294-86-96 294-04-39, 294-83-32
 e-mail: office@galpet.lviv.ua

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Головний інженер ТЗОВ «ІнтерПЕТ»
 Яворський В.З.
 «16» червня 2015 р.

АКТ

**про впровадження наукових та прикладних результатів дисертаційної роботи
 СТУПНИЦЬКОГО ВАДИМА ВОЛОДИМИРОВИЧА
 на тему «Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих
 технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу»**

Комісія у складі головного інженера ТЗОВ «ІнтерПЕТ» Яворського В.З., головного конструктора Данай В.А., провідного технолога Дикого Т.П. встановила використання наукових та прикладних результатів дисертаційної роботи СТУПНИЦЬКОГО ВАДИМА ВОЛОДИМИРОВИЧА при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей транспортних машин та виробів військово-промислового призначення, що є об'єктами виробництва ТЗОВ «ІнтерПЕТ».

Об'єктами впровадження є :

1. Пропозиції щодо структурно-параметричної оптимізації технологічних процесів механічного оброблення деталей ПЗПТ1-2720110 Кронштейн основи нижній та ПЗПТ1-2720120 Кронштейн основи верхній з врахуванням умов їх потенційного використання.
2. Використання адаптованого програмного забезпечення - програмних модулів САФ-системи (Computer Aided Forming), автором яких є Ступницький В.В.
3. Методика встановлення залишкових напружень, як результат механічного оброблення виробів та аналіз їх впливу на формування експлуатаційних властивостей деталей транспортних засобів.

Голова комісії,

Головний інженер ТЗОВ «ІнтерПЕТ»

Яворський В.З.

Члени комісії,

Головний конструктор ТЗОВ «ІнтерПЕТ»
 Провідний технолог ТЗОВ «ІнтерПЕТ»

Данай В.А.
 Дикий Т.П.



А К Т

про використання результатів докторської дисертаційної роботи

Ступницького Вадима Володимировича на тему:

«Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу»

Комісія у складі: голова Лесько Т.З.; члени комісії: Курляк Я.М., Фурік С.В. склали цей акт про те, що практичні результати дисертаційної роботи Ступницького Вадима Володимировича, «Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу» впроваджені у виробничий процес ТДВ "ЛьвівАгроМашПРОЕКТ" в наступному вигляді:

1. Програмне забезпечення автоматизованої технологічної підсистеми формоутворення деталей (CAF-системи), в основі якої лежить проблемно-орієнтований аналіз імітаційної реологічної моделі окремих технологічних переходів та комплекс аналітично-прикладних програм формування параметрів точності, деформаційних, термодинамічних, мікрогеометричних, структурних та фазових параметрів оброблюваних поверхонь деталей машин та обладнання для внесення засобів захисту рослин.
2. Методики імітаційного моделювання мікрогеометричних та залишкових напружено-деформаційних параметрів механічного оброблення деталей з наступним аналізом їх впливу на функціональні властивості окремих поверхонь та виробу в цілому в умовах його потенційної експлуатації.

Використання результатів роботи дозволило: скоротити витрати на розробку проектної документації приблизно на 15%; підвищити продуктивність праці при обробленні деталей машин для внесення засобів захисту рослин на 10-12%.

Голова комісії Лесько Т.З.

Члени комісії:

Курляк Я.М.
Фурік С.В.



АКТ

про використання результатів дисертації В.В.Ступницького на тему « Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу », представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

Нами, начальником навчально-методичного відділу Свіридовим В.М., завідувачем кафедри технології машинобудування д.т.н., професором Грицаєм І.С., к.т.н., доцентом кафедри технології машинобудування Сліпчуком А.М. та к.т.н., доцентом кафедри технології машинобудування Кусим Я.М складено даний акт про те, що результати дисертації докторанта кафедри ТМБ Ступницького В.В. впроваджені у навчальний процес на кафедрі технології машинобудування Національного університету «Львівська політехніка», зокрема:

- у курсах «Теорія різання» та «Технологія машинобудування» використовуються результати досліджень імітаційного реологічного моделювання напружено-деформованого стану поверхонь деталей в процесі їх механічного оброблення;
- у курсах «Технологія машинобудування» та «Технологія механоскладального виробництва» використовуються розроблена в дисертаційній роботі методика структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу та алгоритму розрахунку інтег-

рального кваліметричного показника, який системно характеризує функціональні властивості навантажених поверхонь виробу;

- у курсі «Обладнання та прогресивні методи формоутворення деталей» використовуються результати імітаційного моделювання залишкових напружень та деформацій в процесі формоутворення деталей;
- у курсі «Системи автоматизованого програмування на верстатах з ЧПК» використовується розроблена в дисертації методика побудови автоматизованої підсистеми формоутворення виробів (*Computer Aided Forming System (CAF)*) в складі автоматизованої інтегрованої системи підготовки машинобудівного виробництва;
- при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт з технології машинобудування використовується методика імітаційного моделювання технологічних операцій і переходів в поєднанні з комплексом функціональних модулів та аналітично-прикладних програм формування точнісних, напружено-деформаційних, мікрогеометричних та структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

Начальник навчально-методичного відділу



Свіридов В.М.

Завідувач кафедри технології машинобудування д.т.н., професор



Грицай І.Є

К.т.н., доцент кафедри технології машинобудування



Сліпчук А.М.

К.т.н., доцент кафедри технології машинобудування



Кусий Я.М