

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

**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*

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор,  
**Грицай Ігор Євгенович** - завідувач кафедри технології машинобудування Національного університету «Львівська політехніка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Пасічник Віталій Анатолійович** - завідувач кафедри «Інтегровані технології машинобудування» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

доктор технічних наук, професор  
**Пермяков Олександр Анатолійович** - професор кафедри «Технології машинобудування і металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

доктор технічних наук, професор  
**Луців Ігор Володимирович** – завідувач кафедри «Конструювання верстатів, інструментів та машин» Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя

Захист відбудеться “20” січня 2016 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. С.Бандери, 12, ауд.226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1) та на сайті Національного університету «Львівська політехніка» в розділі «Наука»

Автореферат розісланий “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Шоловій Ю.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Впродовж останнього десятиліття головним чинником економічного зростання промислово розвинених країн стало розроблення та впровадження інтегрованих інформаційних систем управління наукомісткими виробничими процесами. В сучасних машинобудівних САПР системно інтегровані CAD/CAE/CAPP/CAM програмні продукти та реалізовано створення інтерактивної системи інформаційного обміну в єдиних уніфікованих форматах репозиторія даних. В діючих інтегрованих системах підготовки машинобудівного виробництва використовується загальноприйнятий алгоритм автоматизованого технологічного проектування, що передбачає виконання ряду послідовних взаємопов'язаних етапів безітераційного низхідного структурно-параметричного синтезу на основі алгоритму прототипування. При цьому технолог (або автоматизована система технологічного проектування) *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). Сформований за цією методологією технологічний процес в класифікаційному контексті поставленої мети можна вважати об'єктно-орієнтованим.

Проте забезпечення основних експлуатаційних властивостей виробу (зносостійкості, втомної міцності, мастилоутримуючих і антикорозійних властивостей функціональних поверхонь) 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. Але ж *формування цих характеристик виробу залежить від структури та параметрів технологічного процесу його виготовлення і не може бути апріорно проановане конструктором*. 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. Цим забезпечується методологія паралельного інжинірингу в *PLM-системі (Product Life Management)*. Тому копіювання загальноприйнятого алгоритму технологічного проектування суттєво обмежує потенціал інтегрованої автоматизованої конструкторсько-технологічної системи підготовки машинобудівного виробництва.

Таким чином, для комплексного підвищення експлуатаційної якості машинобудівної продукції є **актуальним** створення та впровадження наукових та прикладних засад проектування функціонально-орієнтованих технологій. Функцією мети при формуванні оптимальної структури та параметрів технологічних операцій і переходів є забезпечення засобами паралельного інжинірингу комплексу функціонально-експлуатаційних властивостей виробу при дотриманні заданих конструктором параметрів точності та якості поверхонь, ресурсу роботи, а також організаційних та техніко-економічних обмежень.

**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 Жешувської політехніки (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 структур, взаємозв'язків та можливостей існуючих систем конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва та розробки методів прогнозуючого моделювання процесів механічного оброблення виробів.

- Розробити методичне та алгоритмічне забезпечення автоматизованої технологічної системи формування 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, структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

- Створити науково-методичні основи імітаційного моделювання мікрогеометричних та залишкових напружено-деформаційних параметрів поверхонь деталей в результаті їх механічного оброблення з наступним аналізом впливу результатів моделювання на функціональні властивості виробу 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 наукові засади структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу та алгоритм розрахунку інтегрального кваліметричного показника, який системно характеризує функціональні властивості навантажених поверхонь виробу.

- Провести дослідно-експериментальну та виробничу апробацію 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-деформованого

стану поверхонь деталі, що утворюються під час механічного оброблення 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 релейських 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 реалізувати концепцію системного забезпечення комплексу експлуатаційних показників машинобудівних виробів на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

2. Вперше створено математичне та інформаційне 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 домінуючі експлуатаційні властивості 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 дає змогу системно забезпечити ефективність функціонування

виробу протягом всього його життєвого циклу. Імплементация цієї методології не потребує значних витрат і може бути впроваджена як на машинобудівних підприємствах, так і у науково-проектних компаніях, що працюють над вирішенням проблем в галузі розробки та впровадження автоматизованих систем підготовки машинобудівного виробництва. Побудовані математичні моделі, алгоритми та робочі програми є складовими вперше розробленої автоматизованої системи формоутворення виробів (*CAF*-системи). 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 кафебри технології машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» та при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт за спеціальністю 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, методик, алгоритмів та програм багатокритерійної оптимізації функціонально-орієнтованих технологічних процесів тощо) отримані здобувачем особисто і висвітлені у 59 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, 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-Звенів); 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 (з них 18 одноосібних), 22 публікації 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 535 сторінок; з них 132 рисунка по тексту (62 рисунки на окремих сторінках), 14 таблиць по тексту (11 таблиць на окремих сторінках), 8 додатків на 111 сторінках, список використаних джерел з 327 найменувань на 33 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, висвітлено мету і задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульована наукова новизна та практична цінність роботи.

У *першому розділі* розглянуто проблеми, пов'язані з реалізацією концепції PLM (*Product Life Management*) в інтегрованих системах конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва. Проаналізовані сучасні тенденції розвитку технологічного забезпечення інтегрованих CAD/CAE/CAPP/CAM-систем та розробки методів прогнозуючого моделювання процесів механічного оброблення виробів. Аналіз публікацій показав, що для суттєвого підвищення конкурентоспроможності машинобудівної продукції необхідно створення якісно нової методології конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, що базується на системних принципах паралельності та ітераційності з експлуатаційним етапом життєвого циклу виробу. Особливістю цієї методології, що реалізує PLM-

концепцію, є проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування.

Протягом останніх років сформований якісно новий етап розвитку технології машинобудування, що полягає в розробці наукових основ системного проектування технологічних процесів обробки виробів з найбільш ефективними експлуатаційними властивостями. 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, І.В.Гурей, А.М.Дальський, Н.Б.Дьомкін, В.О.Залога, В.Д.Ковальов, Б.І.Костецький, П.М.Мазур, О.М.Михайлов, В.А.Остаф'єв, В.А.Пасічник, Ю.В.Петраков, Н.С.Равська, Е.Б.Рижов, П.Р.Родін, С.С.Сілін, В.К.Старков, А.М.Суліма, А.Г.Суслов, Ю.В.Тимофєєв, Ю.Г.Шнейдер, П.І. Ящеріцин, R.Black, J.P.Davim, P.Groover, G.Smith, M.Yoshimura та інші.

Для інтегрованої системи автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва використовуються 2 альтернативні концепції технологічного проектування - об'єктно-орієнтоване та функціонально-орієнтоване. 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.

Функцією мети при прийнятті рішень про оптимальну структуру та параметри функціонально-орієнтованого 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.

Методологія функціонально-орієнтованого проектування основана на системі паралельного інжинірингу - *CAPE (Concurrent Art-to-Product Environment)* - система підтримки паралельного проектування (*Concurrent engineering*) з параметричними зв'язками між вхідними та вихідними даними моделей та програмними модулями. Багатошаровість цифрової моделі виробу та координаційні функції *CAPE*-системи суттєво скорочують цикл створення виробу, підвищують технічний рівень проектів, дозволяють уникнути нестиківок і помилок внаслідок взаємозв'язку та контрольованості інформації на всіх стадіях технологічного проектування. Тобто, засобами паралельного інжинірингу реалізується рекурентний та ітераційний взаємозв'язок крос-функціональних етапів конструкторсько-технологічної підготовки виробництва: геометричного моделювання виробів (*CAD*-система), імітації та інженерного аналізу умов їх майбутньої експлуатації (*CAE*-система), проектування структури та параметрів технології їх виготовлення (*CAPP*-система) та програмування механічного оброблення на верстатах з ЧПК (*CAM*-система). У цьому ланцюгу не вистачає лише системи, що формалізує взаємозв'язок між технологією формоутворення виробів з потенційними та



критичними умовами їх майбутньої експлуатації.

На сьогоднішній день в машинобудуванні застосовують такі системи моделювання процесів різання, як *ABAQUS*, *LS-Dyna*, *AdvantEdge*, *DEFORM*. У розвиток методів дослідження процесів імітаційного моделювання процесів формоутворення внесли вагомий внесок такі вчені як О.М.Афонін, С.С.Добротворський, В.О.Залого, Д.В.Криворучко, І.В.Луців, 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. Сучасні системи інженерного аналізу, що реалізують метод скінчених елементів (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 розрахунок напружено-деформованого та термодинамічного стану інструменту і заготовки при механічному обробленні. Загальним недоліком систем, що використовуються для імітаційного моделювання процесів формоутворення є те, що їх адекватність реальним процесам значною мірою залежить від досвіду та кваліфікації проєктувальника, правильності вибору ним критеріїв руйнування, обмежень, особливостей формування кінцево-елементної сітки, її градієнтності для визначення діючих та залишкових напружень та деформацій тощо. Ітераційний та рекурентний зв'язок між етапами конструкторсько-технологічного проєктування та дослідження процесів формоутворення функціонально-важливих поверхонь виробу є відсутній. Отже, існуючі системи імітаційного моделювання процесів механічного оброблення можуть бути лише базою для створення автоматизованої системи формоутворення виробів. Особливою проблемою створення такої системи є реалізація комплексу оперативних методів аналізу структури та параметрів технологічних операцій та переходів, що пов'язують результати напружено-деформованого стану поверхонь виробу в процесі їх оброблення з етапом прогнозування якості його життєвого циклу із врахуванням умов потенційної експлуатації цього виробу в машині або механізмі.

Дослідження впливу структури та параметрів технологічних процесів на якість поверхневого шару та їх зв'язок з домінуючими експлуатаційними показниками виробів (зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійкості та мастилоутримуючої здатності) розглянуті в роботах А.Ю.Албагачієва, В.Ф.Без'язичного, В.Б.Бойцова, Е.Д.Брауна, В.А.Валєтова, Д.В.Василькова, А.М.Дальського, Ю.М.Дроздова, В.В.Запорожця, А.І.Ісаєва, С.А.Клименка, С.М.Корчака, І.В.Крагельського, Б.І.Костецького, В.Д.Кузнєцова, А.А.Маталіна, О.А.Пермякова, Н.С.Равської, Е.В.Рижова, С.С.Сіліна, В.К.Старкова, А.Г.Суслова, Ю.Г.Шнейдера, П.І.Яшеріцина. В цих роботах запропоновані різні математичні моделі та критерії, що формалізують процеси руйнування та трансформації поверхонь деталей при експлуатації, механічному обробленні та поверхневому зміцненні. Основним недоліком цих досліджень є те, що практично всі висновки щодо зв'язку технологічних та експлуатаційних параметрів базуються на результатах експериментальних досліджень і тому не можуть бути використані для оперативного проєктування структури та параметрів технологічного процесу.

Використання методики комплексного аналізу стану поверхневого шару деталі після її механічного оброблення, яка базується на результатах імітаційного моделювання процесів формоутворення, значно підвищує оперативність прийняття ефективних технологічних рішень, сприяє всебічному впровадженню інтегрованих *PLM*-технологій та призводить до суттєвої економії витрат на проведення експериментальних досліджень.

*Другий розділ* присвячено розробленню методології функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів на основі прогнозуючого імітаційного моделювання процесів формоутворення виробів.

Особливістю впровадження функціонально-орієнтованих технологій для ефективної реалізації методології *PLM* у машинобудуванні на основі принципу паралельного проектування є використання *CAF*-системи (*Computer Aided Forming*), концепція якої вперше розроблена у дисертаційній роботі. В основі цієї системи покладено аналіз імітаційної реологічної моделі окремих технологічних переходів і комплекс функціональних модулів та аналітично-прикладних програм формування точнісних, термічно-деформаційних, мікрогеометричних та структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь. Базовими програмними продуктами *CAF*-системи є такі відомі програмні комплекси як *DEFORM*, *Abaqus*, *AdvantEdge*, *LS-DYNA*. Всі ці системи є багатоцільовими програмами МСЕ аналізу і призначені для вирішення дво- та тривимірних динамічних нелінійних завдань пластичного деформування та механіки руйнування, а також пов'язаних з цими процесами завдань. В них реалізовані явний і неявний метод кінцевих елементів з можливістю побудови лагранжевої, ейлерової і гібридної сітки, багатокомпонентна гідродинаміка, метод згладжених ґраток, оснований на методі Галеркіна. *CAF*-система органічно доповнює існуючий інтегрований комплекс *CAD/CAE/CAPP/CAM* систем, забезпечуючи прогностичну можливість імітаційного моделювання та встановлення залежності основних кваліметричних показників виробу від структури та параметрів технологічного процесу механічного оброблення деталі (рис.1).

Враховуючи особливості використання альтернативних концепцій технологічного проектування, рекомендується 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 мікрогеометричних показників виробу (етап об'єктно-орієнтованого проектування) і наступній корекції цих технологічних параметрів, виходячи із

змодельованих потенційних та критичних умов експлуатації цього виробу (етап функціонально-орієнтованого проектування).

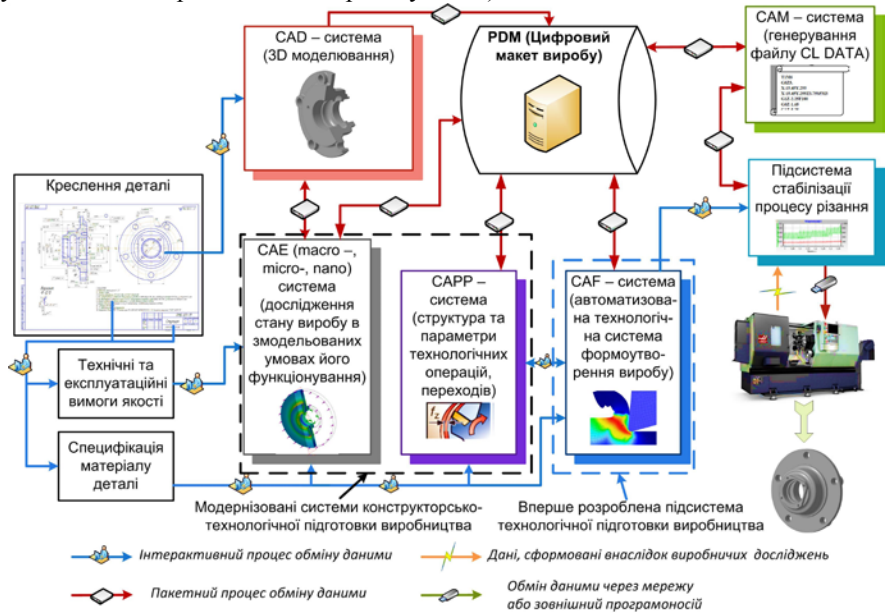


Рис.1. Структурна схема модернізованої інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва

На рис.2 представлена вперше розроблена структурно-логічна схема функціонування *CAF*-системи в складі інтегрованої конструкторсько-технологічної системи підготовки виробництва (*CAD/CAE/CAPP/CAM*), що включає в себе такі етапи: формування цифрового макету виробу; формалізація та моделювання умов забезпечення ефективного функціонування виробів; пресинтез структури та параметрів технологічного процесу; імітаційне реологічне моделювання напружено-деформованого, термодинамічного та структурно-фазового стану найбільш відповідальних поверхонь деталі в процесі їх формоутворення; прогнозування функціональних властивостей виробу; коректування структури і параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу у відповідності до забезпечення заданих, необхідних або граничних умов експлуатації виробу в машині або технологічній системі.

Для найповнішого використання можливостей *CAF*-системи, основаної на результатах імітаційного реологічного моделювання технологічних переходів механічного оброблення деталей, сформована база даних та база знань, що включають в себе: формалізовану проблемно-орієнтовану інформацію щодо фізико-механічних характеристик оброблюваного та інструментального матеріалу (механічні та термодифузійні характеристики, криві термодинамічного зміцнення матеріалів, їх структурно-фазовий стан до оброблення тощо); методика та алгоритм вибору критерію руйнування; модель текучості матеріалу (узгалънена модель Джонсона-Кука); метод ітераційного



Рис.2. Узагальнений алгоритм функціонування CAF-системи у структурі інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва (CAD/CAPP/CAM)

числення (Ньютона-Рафсена чи прямий ітераційний метод) та відповідний вирішувач (Skyline чи метод розріджених матриць); метод розрахунку похибки збіжності результатів; метод побудови Лагранжевої або Ейлерової сітки для МСЕ аналізу; моделі зношування та наростоутворення інструменту.

Таким чином, методологія проектування функціонально-орієнтованого технологічного процесу включає в себе вирішення ряду проблем, пов'язаних з адекватним імітаційним моделюванням напружено-деформованого стану деталей в процесі їх формоутворення: формалізацією процесів кінетики дислокацій методом скінчених елементів та визначення векторної характеристики руху дислокацій; використання в САF-системі формалізованого опису кривих зміцнення оброблюваного матеріалу, що аналітично описують вплив швидкості деформації з урахуванням залежності деформації від в'язкості матеріалу заготовки, температури, наклепу, зміни напружень в просторі та часі і т.п.; методику вибору типу та динамічної густини рухомої градієнтної сітки та забезпечення умов її невинорджуваності; вибір моделі текучості матеріалу та критерію його руйнування в процесі формоутворення. У відповідності до узагальненого алгоритму функціонування САF-системи (рис.2), результати аналізу напружено-деформованого стану поверхонь в процесі їх формоутворення є базою для моделювання мікротопології поверхонь, залишкових напружень та деформацій. Таким чином реалізується формалізація прогностичних зв'язків між структурою та параметрами технологічного процесу оброблення деталей та домінуючими експлуатаційними властивостями деталей (забезпечення зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійкості, триботехнічної якості рухомих спряжень, мастилоутримуючої здатності поверхневого шару тощо).

Залежність величини напруження у виробі, що пластично деформується, при лінійному напруженому стані, від величини деформації формалізують криві зміцнення. Деформації, що змінюються залежно від величини і швидкості зміни напруження, що викликають пластичну деформацію під час формоутворення поверхонь виробу за відповідних температурно-швидкісних умов деформації, викликані напруженням текучості -  $\sigma_s$ . Опір деформації формоутворення описується рівнянням в часткових похідних:

$$d\sigma_s = \frac{\partial\sigma_s}{\partial T} dT + \frac{\partial\sigma_s}{\partial\varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial\sigma_s}{\partial\dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon}, \quad (1)$$

де  $\sigma_s$  - межа текучості;  $T$  - температура в зоні стружкоутворення;  $\varepsilon$  - відносна деформація;  $\dot{\varepsilon}$  - інтенсивність зміни деформації.

На основі встановлених в дисертаційній роботі взаємозв'язків деформаційних, руйнівних та післядеформаційних процесів, структурно-фазових змін в умовах високих температур в зоні різання ці параметри використовуються при оптимізації структури і параметрів технологічного процесу. Для врахування проміжних станів матеріалу заготовки під час різання, згідно положень теорії пружності та пластичності, проведений аналіз адекватності розрахункових концепцій та моделей формоутворення, що базуються на використанні різних критеріїв руйнування.

Проаналізувавши результати імітаційного моделювання різання різнорідних матеріалів із застосуванням деформаційних, енергетичних та силових критеріїв руйнування (моделі Мак-Клінтока, Райса-Трейсі, Кокрофта-Лейтема та інш.), зроблені такі висновки: з метою порівняльного аналізу різних моделей формоутворення доцільно використання тільки нормалізованих критеріїв; при використанні деформаційних критеріїв руйнування (Мак-Клінтока) чітко простежуються етапи динаміки його зміни (рис.3)– зростання (зона 1), релаксація (зона 2), стабілізація (зона 3), 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 концептуальної моделі фізичного механізму процесу різання за енергетичним критерієм, формоутворення відбувається внаслідок руйнування міжатомних зв'язків за допомогою теплового руху, енергетичні сплески якого перевищують енергію цих зв'язків. Тому при використанні енергетичних критеріїв (наприклад, Кокрофта-Лейтема) різкого зростання критерію руйнування не спостерігається, що викликано врахуванням впливу температурних процесів, які частково анігують початковий спалах деформаційних явищ, особливо для пластичних матеріалів. Враховуючи вищенаведені висновки та співставлення їх з теоретичними положеннями, для реологічних моделей різання пластичних матеріалів (сталі, дюралюміні, титаномістки та мідномістки сплави) найбільш доцільним є використання енергетичних критеріїв руйнування, а для різання умовно-крихких матеріалів (чавуни, силуміни, бронзи 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). Як показали проведені в дисертаційній роботі чисельні розрахунки та аналіз результатів імітаційного моделювання в системі Deform 2D(3D), для матеріалів, що характеризуються анізотропією пружних і міцнісних властивостей, вплив застосування різних критеріїв руйнування матеріалів на результати розрахунків в першу чергу залежить від інтенсивності деформації  $\dot{\epsilon}$ .

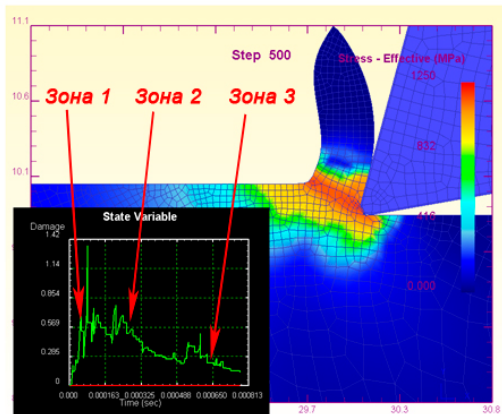


Рис.3. Приклад динаміки зміни нормалізованого критерію руйнування МакКлінтока (метод оброблення – точіння, матеріал деталі – сталь 35; режими різання  $t=0,2$  мм,  $S=0,25$  мм;  $V=120$  м/хв)

На рис.4 наведений приклад імітаційного моделювання зон стиску та розтягу при лезовому обробленні заготовки з конструкційної сталі 45 ( $S=0,25\text{мм}$ ;  $t=1\text{ мм}$ ;  $V=120\text{ м/хв}$ ). В області контакту заготовки з передньою поверхнею різального клина біля його вершини виникає напруження стиску матеріалу заготовки (зона стиску 1), аналогічна картина стиску спостерігається з протилежного боку області 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 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 напружень в зонах розтягу 1 і 2 приблизно однакові ( $\tau_{xy} \approx 180...200\text{ МПа}$ ), то інтенсивність напружень стиску в зоні 1 є вищою ( $\tau_{xy} \approx 560\text{ МПа}$ ), але більш локальною. В даному випадку саме інтенсивність та локалізація зон стиску 1 і розтягу 3 формує залишкові напруження та деформації на обробленій поверхні заготовки. Формування та інтерференція зон стиску та розтягу дозволяють моделювати поточний та залишковий напружено-деформований стан оброблюваних поверхонь, що, в свою чергу, суттєво впливає на формування експлуатаційних характеристик оброблюваного виробу.

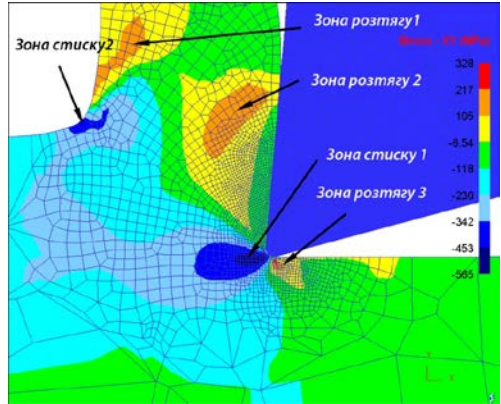


Рис.4. Реологічна картина розподілу зон напруження під час оброблення заготовки зі сталі 45 ( $S=0,25\text{мм}$ ;  $t=1\text{ мм}$ ;  $V=120\text{ м/хв}$ )

інтенсивність та локалізація зон стиску 1 і розтягу 3 формує залишкові напруження та деформації на обробленій поверхні заготовки. Формування та інтерференція зон стиску та розтягу дозволяють моделювати поточний та залишковий напружено-деформований стан оброблюваних поверхонь, що, в свою чергу, суттєво впливає на формування експлуатаційних характеристик оброблюваного виробу.

У *третьому розділі* наведені результати методологічних досліджень впливу силових, температурних чинників та параметрів геометрії різального інструменту на формування напружено-деформованого та термодинамічного стану поверхонь деталей з різномірних машинобудівних матеріалів в процесі різання. Аналіз такого проблемно-орієнтованого імітаційного моделювання силових, температурних та деформаційних параметрів є основою для побудови прогнозуючих моделей впливу структури та параметрів технологічного процесу на формування комплексу експлуатаційних властивостей виробу.

Швидкість руху (рис.5) стружки  $V_c$  по передній поверхні різального клина з переднім кутом  $\gamma$  визначатиметься за формулою:

$$V_c = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} V_w = \frac{V_w}{\xi} \quad (2)$$

де  $\phi$  - кут зсуву;  $\xi$  - коефіцієнт усадки стружки.



Деформації в будь-якій точці в зоні зсуву:

$$\varepsilon = \operatorname{tg}(\phi - \gamma) + \operatorname{ctg}(\phi) \quad (3)$$

Інтенсивність зміни деформацій (*strain rate*), що в найбільш повній мірі впливає на формування критерію руйнування при різанні:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\cos \gamma}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot \frac{V_w}{\Delta y} \quad (4)$$

де  $\Delta y$  – товщина пластичної зони зсуву.

Для аналізу адекватності теоретичних розрахунків та даних реологічної моделі, проведений аналіз даних за результатами дослідження імітаційної моделі. На рис.5 наведений приклад аналізу результатів імітаційного моделювання лезового оброблення деталі зі сталі 45 ( $S=0,4$  мм;  $t=0,5$  мм,  $V=120$  м/хв). Аналіз зони стружкоутворення, дозволяє визначити кут зсуву  $\phi \approx 35^\circ$ . Тоді

деформації для вибраної в зоні зсуву деякої точки  $P_1$  визначатимуться за формулою (3):

$$\varepsilon = \operatorname{tg}(35^\circ - 5^\circ) + \operatorname{ctg}(35^\circ) = 1,97$$

За даними реологічної імітаційної моделі деформація в точці  $P_1$  становить величину  $\varepsilon = 2,03$ . Тобто похибка теоретичних та експериментальних даних складає лише 2,9%. Аналогічні розрахунки проведені для визначення інтенсивності деформації. Товщина пластичної зони зсуву знаходиться в межах  $\Delta y = 0,12 - 0,14$  мм. Значення інтенсивності деформації в т.  $P_1$   $\dot{\varepsilon} = 10400$  ( $\text{с}^{-1}$ ). Швидкість переміщення в т.  $P_1$  за даними імітаційної моделі,  $V_w = 1240$  мм/с. Тоді за формулою (4), інтенсивність деформації матеріалу заготовки в точці  $P_1$

становитиме:  $\dot{\varepsilon} = \frac{\cos(5^\circ)}{\cos(35^\circ - 5^\circ)} \cdot \frac{1240}{0,13} = 10670$  ( $\text{с}^{-1}$ ). Таким чином похибка

теоретичних та змодельованих даних становить лише 2,5%.

Для аналізу впливу різних чинників на реологічну картину різання та співставлення результатів імітаційного моделювання процесів різання з відомими результатами досліджень В.М.Подураєва, С.С.Сіліна та П.М. Ящеріцина та інш., були 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

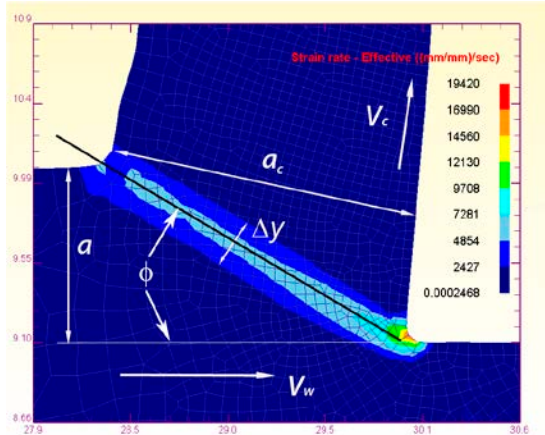


Рис.5. Схема для визначення деформацій в зоні зсуву



того, на початку процесу різання в зоні формоутворення відбуваються інтенсивні перехідні процеси, що супроводжуються різкими перепадами силових параметрів та напружено-деформованого стану виробу (що є джерелом автоколивань), а також термодформаційними явищами, які матимуть вплив на формування точнісних параметрів та експлуатаційних властивостей виробу (втомної міцності, корозійної стійкості тощо).

Так, в результаті аналізу результатів імітаційного моделювання технологічних операцій механічного оброблення деталей з низьковуглецевих сталей (наприклад, сталь 20), встановлено, що тривалість перехідних процесів є досить короткочасною - приблизно 1,0 мс. В усталеному циклі механічного оброблення коливання радіальної сили  $P_y$  є незначними - приблизно 5-7% від номінального значення складової сили різання, тому забезпечення високої якості обробленої поверхні за рахунок керованості режимами різання є достатньо ефективним. Наявність у низьковуглецевих сталей 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 перехідного процесу різання в 2,5 рази (до 2,5 мс) та збільшення коливання радіальної сили  $P_y$ , що становить приблизно 15-17% від загальної сили різання. Аналіз результатів реологічного моделювання технологічних операцій лезового оброблення деталей з високолегованих сталей показав, що збільшення вмісту вуглецю в 3,5 рази (для прикладу, оброблення легованих сталей 10X17P13M2T та 34X2H2M) призводить до підвищення 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 коливання 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 системи ВПД. 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.

Наведені в результаті імітаційних реологічних досліджень процесів різання параметри напружено-деформованого стану заготовки та інструменту в різних областях зони стружкоутворення, при різних крайових умовах моделювання (геометрія інструменту, матеріали, режими різання тощо) корелюються з відомими з літературних джерел результатами експериментальних та теоретичних досліджень і цим підтверджується їх адекватність. Розроблена в дисертації методика моделювання є базою для реалізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

У **четвертому розділі** наведені вперше розроблені моделі формування параметрів мікрогеометрії та якості поверхонь деталей машин деталей у автоматизованій технологічній системі формоутворення (CAF-системі).

Мікрорельєф обробленої поверхні утворюється в результаті векторного додавання висоти мікронерівностей, отриманої в процесі копіювання різальної частини інструмента з урахуванням кінематичних характеристик її руху ( $\Delta_1$ ),

висоти мікронерівностей, яка визначається автоколиваннями різального інструмента ( $\Delta_2$ ) та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки ( $\Delta_3$ ). Причому параметри деформаційної та вібраційної складової мікронерівності визначаються, як правило, в результаті складних експериментальних досліджень і тому не можуть бути оперативно розраховані. Крім того, для забезпечення більшості експлуатаційних властивостей виробів важливо знати не тільки інтегральні висотні характеристики мікронерівностей, але й характер їх розподілу по виступах та впадинах, крокові параметри тощо.

В процесі формоутворення поверхонь деталей виникають вимушені коливання системи верстат-заготовка-інструмент, що спричинені динамічною дією зовнішніх сил, і автоколивання елементів системи ВПІД. Автоколивні процеси відбуваються внаслідок розбалансованості внутрішньосистемних чинників – відставанням зміни сили різання від зміни товщини зрізу, динамічною характеристикою величини сили різання, що зменшується при зростанні швидкості різання, а також динамікою кута зсуву  $\phi$ . Розрахункова схема динамічної моделі процесу оброблення зображена на рис.6.

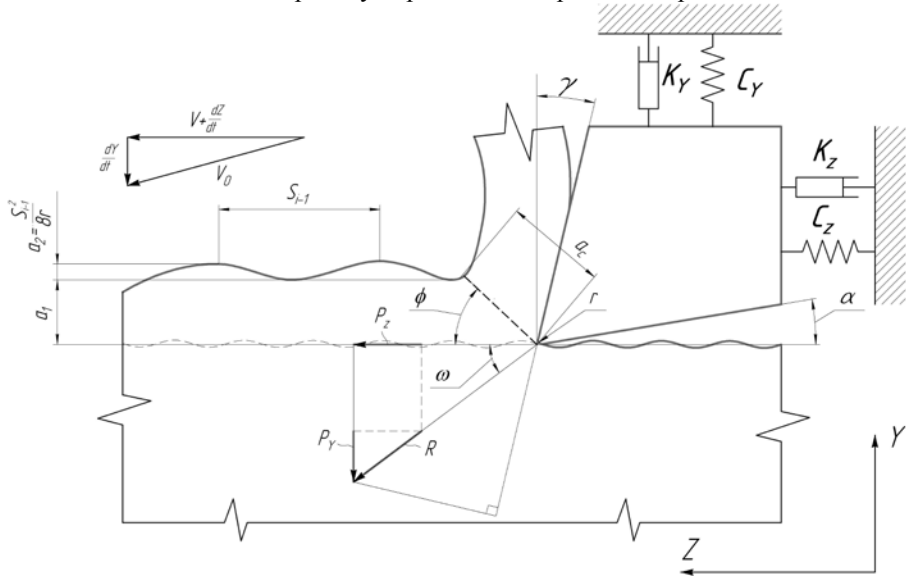


Рис.6. Розрахункова схема динамічної моделі процесу лезового оброблення деталі, що враховує регенеративні коливання різального інструменту

З врахуванням регенеративних коливань, дійсна товщина зрізу  $a$  стає змінною величиною, що залежить від постійної величини  $a_1$  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. Приймаємо, що  $a \cdot b = S_i \cdot t$ . З метою визначення вібраційної складової

мікронерівності профілю побудована нелінійна динамічна модель автоколиваний технологічної системи, що також враховує регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому переході:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left( t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left( 1 + \sin \left( \frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left( t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left( 1 + \sin \left( \frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\cos \omega}{\sin \phi \cdot \cos(\phi + \omega)} \end{cases} \quad (5)$$

де  $M$  - приведена маса системи;  $K_Y$ ,  $K_Z$  - узагальнені коефіцієнти демпфування по осях  $Y$  і  $Z$ , відповідно;  $C_Y$ ,  $C_Z$  - приведена жорсткість системи по осях  $Y$  і  $Z$ , відповідно;  $\tau_{yz}$  - дотичне напруження в площині зсуву;  $\omega$  - кут дії між силою стружкоутворення  $R$  і напрямом швидкості різання  $V$ ;  $t$  - глибина різання.

Для великих швидкостей різання з врахуванням формули Мерчанта  $\omega = \pi/2 - 2\phi$  формула (5) набуде вигляду:

$$\begin{cases} M\ddot{y} + K_Y \dot{y} + C_Y y = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left( t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left( 1 + \sin \left( \frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot (\text{ctg}^2 \phi - 1) \\ M\ddot{z} + K_Z \dot{z} + C_Z z = \tau_{yz} \cdot S_i \cdot \left( t + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left( 1 + \sin \left( \frac{2\pi z}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot 2\text{ctg} \phi \end{cases} \quad (6)$$

Для середніх швидкостей різання ( $V < 100$  м/хв) використовується вираз для розрахунку кута дії за формулою Окслі:  $\omega = (\phi - 0,28\pi)/0,8$ . Інтегруючи систему рівнянь чисельними методами з використанням програмного пакету MatLAB, розраховуються амплітудно-частотні характеристики коливань технологічної системи, а відтак визначається величина вібраційної складової мікронерівності  $\Delta_2$ .

Пластично-деформаційна складова мікронерівності ( $\Delta_3$ ) формується в результаті протікання трибопроцесів взаємодії інструменту і заготовки, що призводить до утворення вторинної перехідної пластично-деформованої зони. Саме ця складова мікронерівності найбільш суттєво впливає на формування мастилоутримуючої властивості поверхні виробу. Для вирішення поставленої наукової задачі визначення складової  $\Delta_3$  використаний математичний апарат моделювання процесу пластичного витиснення, як частковий випадок вирішення задачі Прандтля. Розглядається вид деформування поверхонь, що настає, коли контактні напруження перевищують межу текучості і матеріал обтікає проникає контртіло в контактній зоні пари тертя «інструмент - оброблювана заготовка».

Використовуючи результати реологічного імітаційного моделювання процесу різання згідно розробленої методики, розраховуються значення деформаційної складової мікронерівності профілю обробленої поверхні деталі. На основі опрацювання результатів досліджень розроблених в дисертації математичних та імітаційних моделей в складі САF-системи, зроблений висновок, про те, що величина деформаційної складової  $\Delta_3$  зростає як із

збільшенням радіусу  $r$  при вершині інструменту, так і від подачі  $S$ . Причому, зростання саме величини подачі  $S$  найбільш суттєво позначається на результатах формування параметру  $\Delta_3$ . Так, зростання радіусу при вершині різального клина в 10 разів (з 0,1 до 1,0 мм) спричинює збільшення деформаційної складової мікронерівності  $\Delta_3$  при механічному обробленні заготовки зі сталі 45 лише в 2,2 рази – з 5 до 11 мкм. В той же час збільшення величини подачі з 0,05 до 0,8 мм призводить до зростання параметру  $\Delta_3$  в 7 разів (з 2 до 14 мкм). Таким чином формалізується важливий зв'язок впливу геометричних параметрів різального інструменту та режимів механічного оброблення на забезпечення експлуатаційних параметрів виробу.

В процесі формоутворення деталей відбувається пластична деформація, що супроводжується подрібненням і витягуванням кристалічних зерен у напрямі деформації, викривленням площин ковзання і виникненням залишкових 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. Аналітична формалізація цього динамічного процесу є вкрай складною. Вперше розроблена методика встановлення величини залишкових напружень ( $\pm\sigma_s$ ), глибини їх залягання на основі аналізу результатів реологічного моделювання процесів механічного оброблення деталей. Динаміка термодеоформаційних залишкових напружень I роду відображає інтерференційну картину прояву флюктуаційних розтягувальних (фрикційних) та стискуючих (силових) навантажень та змінну картину глибоких термічних процесів в зоні формоутворення поверхонь деталей.

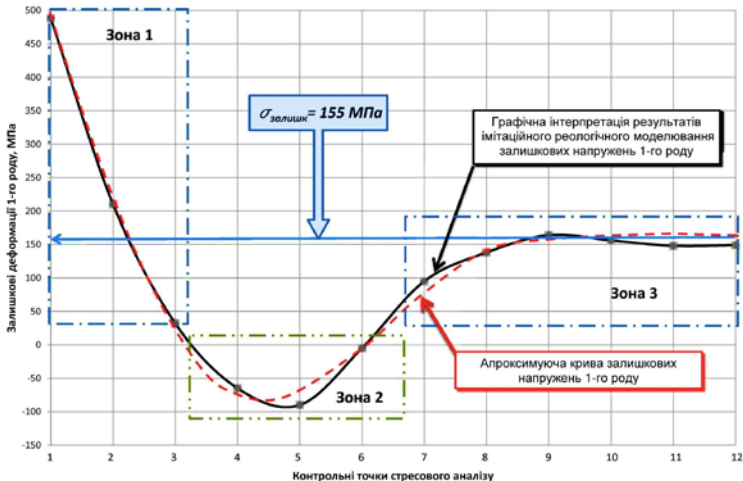


Рис. 7. Результати моделювання залишкових напружень для технологічного переходу фінішного токарного оброблення гартованої поверхні деталі зі сталі 3Х2В8Ф інструментом з композитною пластинкою на основі CNB марки СВ7025

В результаті імітаційного моделювання лезового оброблення гартованої поверхні деталі зі сталі 3Х2В8Ф інструментом з композитною пластинкою на

основі *CNB* марки *CB7025* ( $S=0,05$  мм;  $t=0,12$  мм;  $V=50,2$  м/хв) середньостатистичне значення залишкових напружень в зоні термічної стабілізації (при температурі близько  $100^{\circ}\text{C}$ ) складає приблизно 155 МПа (рис.7). Формування превалюючих зон формування залишкових напружень стиску (зони 1 і 3) спричинено домінуванням силового чинника на відміну від зони 2, де напруження розтягу формуються внаслідок домінування температурних деформацій.

На основі аналізу наведених в дисертаційній роботі результатів імітаційного реологічного моделювання для фрезерування титанового сплаву *BT6* (аналог *TI6AL4V*) та алюмінієвого сплаву *AD33* (аналог *AL 6061*) зроблені 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 *AD33* фрезою *CoroMill 300* з для пластинкою *R300-1040D-PL S30T* ( $S=0,1$  мм;  $t=0,5$  мм;  $V=800$  м/хв). Результати імітаційного моделювання підтверджені проведеними експериментальними дослідженнями.

В дисертаційній роботі вперше запропоновано методику моделювання залишкових напружень II роду, що є еквівалентними середньостатистичній густині різних структурних фаз у відповідності до їх відсоткового вмісту у складі матеріалу обробленої поверхні з поліфазною структурою. Аналіз імітаційних реологічних досліджень алотропних перетворень в процесі формоутворення дозволив зробити такі висновки: отримані результати реологічного моделювання цілком корелюються з експериментальними даними та величинами, наведеними в довідкових та наукових літературних джерелах; 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 імітаційного моделювання в *CAF*-системі технологічної операції 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 – лише на 28% (з 80,8 МПа до 103,4 МПа). Причому найбільш інтенсивні за величиною напруження II роду знаходяться на глибині до 6 мкм, а на глибині 10 мкм вони майже повністю зникають. Проблемно-орієнтоване реологічне моделювання технологічних операцій та 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 складову залишкових напружень та врахувати вплив технологічних параметрів на формування цього важливого показника для забезпечення ефективних умов експлуатації виробів.

Складний математичний апарат, що використовувався для вирішення систем диференціальних рівнянь та аналізу збіжності результатів МСЕ, передбачає використання наближених методів обчислення, що може позначитись на

адекватності результатів аналітичного розрахунку дійсним показникам. З метою верифікації результатів імітаційного моделювання проведений ряд експериментальних досліджень, результатом яких є оцінка взаємного впливу технологічних чинників (режимів різання та геометрії різального інструменту) на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталей лезовим інструментом. Залишкові напруження визначались експериментально за допомогою акустопружного методу, який полягає в аналізі зміни швидкості проходження ультразвукових хвиль по дослідних зірцях, що підлягали обробленню (рис.8). Для визначення напружень використовувались релєївські поверхневі акустичні хвилі (ПАХ). Ці хвилі поширюються по поверхні зразка в шарі товщиною 1-2  $\Lambda$  (де  $\Lambda$  – довжина ПАХ). При дослідженні використовувались хвилі частотою 3 МГц, що відповідає  $\Lambda=1$  мм. Похибка визначення швидкості становила менше 0,05%. При наявності на поверхні деталі деформації розтягу швидкість проходження ПАХ збільшується, а при деформації стиску – зменшується. Напруження визначались з виразів:

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \beta_1 \sigma_{11} + \beta_2 \sigma_{22};$$

$$\frac{\Delta V_2}{V_2} = \beta_2 \sigma_{11} + \beta_1 \sigma_{22};$$
(7)

де  $V_1$  і  $V_2$  – швидкості ПАХ, які поширюються в напрямках 1( $X$ ) та 2( $Y$ );  $\Delta V_1$  і  $\Delta V_2$  – зміна відповідних швидкостей під дією механічних напружень;  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$  – компоненти тензора залишкових механічних напружень;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  – акустопружні коефіцієнти.

Дослідження результатів аналізу впливу режимів різання на формування залишкових напружень та деформацій в процесі механічного оброблення деталі проведені по методиці багатофакторного експерименту. Умови проведення експерименту – дослідження технологічної операції високошвидкісного фрезерування деталі з алюмінієвого сплаву AL 6061 фрезою CoroMill 300 ( $\varnothing 200$  мм) з тврдосплавною пластиною R300-1040D-PL S30T. Діапазони досліджуваних параметрів



Рис.8. Експериментальна установка для визначення залишкових напружень акустопружним методом

знаходяться в інтервалах: 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. Математичне опрацювання результатів експериментальних досліджень довело адекватність реологічного імітаційного моделювання реальним показникам процесу лезового оброблення. Відхилення експериментальних даних від змодельованих для різноманітних умов оброблення деталі з сплаву AL 6061 не перевищує 11%.

У *п'ятому розділі* наведена методологія структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

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. Найбільш важливі характеристики функціональної ефективності певної  $j$ -ї поверхні  $i$ -ї деталі  $\{F_i\}$  оцінюються 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 поглинання теплової енергії ( $q_{ij7}$ ); властивості забезпечення герметичності з'єднань ( $q_{ij8}$ ) тощо.

Узагальнена блок-схема алгоритму структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу наведена на рис.9 і складається з таких етапів:

1. Етап інтерактивного внесення інформації (вхідних даних) в систему: моделювання виробу в САД-системі та попередній інженерний аналіз в САЕ-системі. Для кожної  $i$ -ї деталі, що включає в себе  $j = \overline{1J}$  поверхонь в систему інтерактивно вносять конструкторську інформацію  $\{E_{f_{ij}}\} \cap \{L_{ij} \wedge D_{ij}\} \cap \{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\} \cap \{HB_{ij}\}$  про такі параметри, як геометрична форма  $\{E_{f_{ij}}\}$  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.9). Крім того, формалізації підлягають фізико-механічні показники матеріалу даної деталі  $Md_i = \{\sigma_{bi}; \sigma_{pi}; \sigma_{-li}; \tau_{-li}; E_i; G_i; \mu_i; \lambda_i; t_{xi}\}$ . 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.

2. Пресинтез структури і параметрів технологічного процесу в САРР-системі (блок 2). Під час реалізації цього етапу формується базовий варіант маршруту 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  $\text{Mins}_{ixy}(\text{var}):$

$$\text{Ins}_{ixy} = \{ \gamma_{ixy}(\text{var}) \wedge \alpha_{ixy}(\text{var}) \wedge \varphi_{ixy}(\text{var}) \wedge \text{Mins}_{ixy}(\text{var}) \forall y = \overline{1, Y} \}. \quad \text{Попереднє}$$

формування альтернативних варіантів структури та параметрів технологічного процесу відбувається на основі методології прототипування і включає в себе ряд формальних процедур розпізнавання геометричної форми об'єкту виробництва  $\{E_{f_{ij}}\}$  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 ревалентний 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. При цьому маршрут оброблення компонується 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. 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 САД-системою та узгодженими САЕ-системою у відповідності з експлуатаційними вимогами:  $\{E_{f_{ij}}\} \cap \|L_{ij} \wedge D_{ij}\| \cap \{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\} \cap \{HB_{ij}\}$ .

3. Етап моделювання та аналізу напружено-деформованого стану виробу в процесі його формоутворення, реалізований в САЕ-системі (блок 5). Для кожного  $x$ -го варіанту структури технологічної операції і  $y$ -го варіанту технологічного переходу в САЕ-системі імітаційно моделюється картина напружено-деформованого стану  $NDS_{xy}$  відповідної поверхні (в т.ч. залишкові параметри напруження I і II роду та деформації) в процесі її формоутворення:

$$NDS_{xy} = \{ \bar{\sigma}_{xy}; \bar{\tau}_{xy}; \sigma_{xy}^{\pm}; T_{xy}; \varepsilon_{xy}; \dot{\varepsilon}_{xy}; \beta_{xy}; \sigma_{залху}^I; \sigma_{залху}^{II}; \Delta_{xy} \}.$$

На основі цих розрахунків визначаються параметри геометрико-кінематичної складової мікронерівності  $\Delta_1$ , вібраційної складової  $\Delta_2$  та деформаційної складової  $\Delta_3$ . Вирішення цієї задачі формалізує процес формування мікронерівностей профілю як множини параметрів мікротопології поверхні:

$$\{Rmax; Rpk; Rvk; Rk; v; t; B; Kp; Kv\} = f(\Delta_1; \Delta_2; \Delta_3)$$

4. При моделюванні трибоконтакту параметри мікротопології поверхонь повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні – блок 9. 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.

5. Етап розрахунку локальних критеріїв - інтенсивності зношування функціональних поверхонь в імітованих умовах потенційного функціонування



виробу (блоки 6-10); коефіцієнту запасу за показником втомної міцності функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації (блок 11); показника залежності динамічної якості трибоспряжень функціонально-важливих поверхонь деталі (блок 12); параметру залежності корозійної стійкості (фретинг-корозії) поверхонь деталі (блок 13); коефіцієнту запасу рідинного трибонконтакту функціональних поверхонь деталі (блок 14) в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь.

6. Етап інтерактивного лінійного нормування кваліметричних критеріїв  $Q_n$  (блок 16) та поточного розрахунку функції мети вибраного структурно-параметричного варіанту функціонально-орієнтованого технологічного процесу (блок 17) на основі розрахунку пріоритетів  $\alpha_n (\forall n = \overline{1,8})$  вагових коефіцієнтів кожного  $q_{ijn}$ -го локального критерію певної  $j$ -ї поверхні ( $j = \overline{1, J}$ )  $i$ -ї деталі (блок 15). З цією метою в дисертаційній роботі розроблена програма в системі *Visual Basic*. Враховуючи різноплановий характер впливу окремих локальних критеріїв на експлуатаційні властивості об'єкту виробництва, для кожного  $q_{ijn}$ -го локального критерію визначається значення супремуму (операнд виділення найбільш ефективного (з функціональної точки зору)) значення локального критерію  $q_n (\forall n = \overline{1,8})$  та інфімуму (операнд виділення найменш ефективного значення критерію  $q_n (\forall n = \overline{1,8})$ ) зі всієї множини його допустимих значень (блок 16):

$$q_n^{\max} = \sup \{q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N}\}; \quad q_n^{\min} = \inf \{q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N}\} \quad (8)$$

$$Q_n = (q_{n_{xy}} - q_n^{\min}) / (q_n^{\max} - q_n^{\min}) \in [0; 1] \quad (9)$$

7. Етап направленого пошуку альтернативних варіантів структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу (блоки 20-25) у-го технологічного переходу  $x$ -ї операції:  $P_{ix(y+1)} = \{V_{ix(y+1)}(var); S_{ix(y+1)}(var); t_{ix(y+1)}(var); Ins_{ix(y+1)}(var)\}$  та генерування альтернативних варіантів структури технологічного процесу:  $M_{i(x+1)y} = \{O_{i(x+1)y}(var)\}$  відбувається за вперше розробленими в дисертаційній роботі евристичними правилами.

8. Етап формалізації результатів структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу за системним кваліметричним критерієм (блок 26). Найбільш ефективним інструментарієм прийнято метод звертання множини локальних нормалізованих критеріїв в єдиний показник, еквівалентний за умовами комутативності та безперервної диференціації в просторі показників  $\{F_i\}$  по всіх показниках функціональної ефективності  $\{q_{ijn} \mid \forall n = \overline{1, N}\}$  для  $j$ -ї поверхні ( $j = \overline{1, J}$ )  $i$ -ї деталі. В даному випадку параметричною формою оператора звертання є адитивна нормувальна залежність:

$$K(F_i) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \cdot Q_n \neq 0 \forall n = \overline{1, N} \quad (10)$$

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.

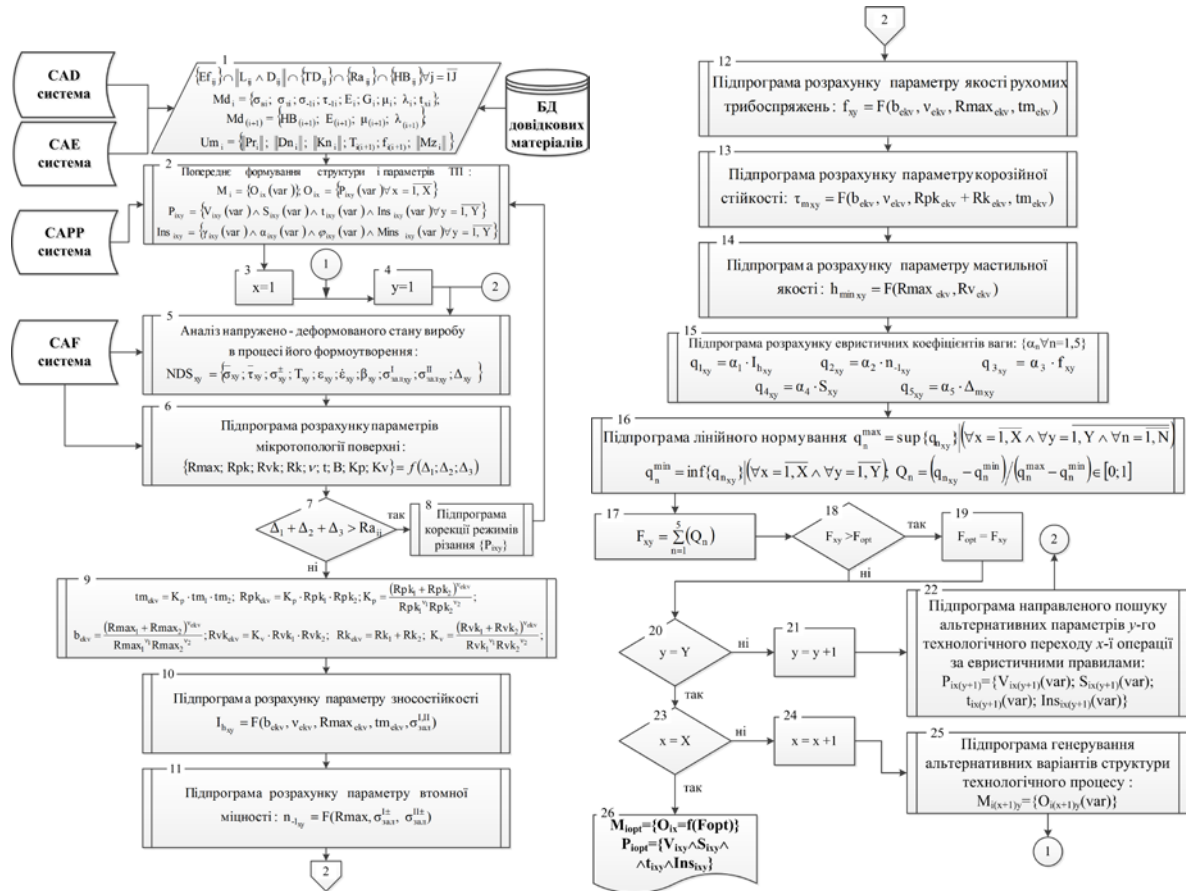


Рис.9. Блок-схема алгоритму структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

*У шостому розділі* наведений узагальнюючий приклад ефективності застосування теоретичних положень проектування функціонально-орієнтованого технологічного процесу. Вирішується задача вибору оптимального варіанту оброблення найбільш точних циліндричних поверхонь виштовхувачів прес-форм на викінчувальній операції. 1-й варіант: викінчувальне шліфування абразивним кругом; 2-й варіант: тонке точіння лезовим інструментом з композитною пластинкою на основі полікристалічного кубічного нітриду бору (запропоновано використання пластини *Sandvik Coromant* з геометрією *Wiper (WH)* марки *CB7025 (60% CNB)* з бімодальним розподілом зерен в керамічній зв'язці).

Для визначення основних критеріїв ефективності функціонально-орієнтованого технологічного процесу в *CAF*-системі побудована імітаційна реологічна модель формоутворення основних функціональних поверхонь виштовхувача та визначені показники напружено-деформованого стану, параметри мікротопології поверхні та його структурно-фазового стану.

Для лезового оброблення інструментом з композитною пластинкою *CB7025* геометрико-кінематична складова мікронерівності  $\Delta_1$  становить:

$$\Delta_1 = \frac{S^2}{8r} = 0,000625 \text{ мм} = 0,625 \text{ мкм} \quad (11)$$

Величина вібраційної складової мікронерівності ( $\Delta_2$ ) розраховується на основі інтегрування системи рівнянь (5) чисельними методами з використанням програмного пакету *MatLAB*. 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).

Мікрорельєф поверхні в радіальному напрямі моделюється накладенням на масив переміщень інструменту профілю його вершини в плані з амплітудою коливань інструменту  $A_{\max}$ , із врахуванням сліду вершини інструменту на даному технологічному переході  $H_B$ . В цьому випадку:

$$\Delta_2 = 2A_{\max} - H_B = 0,00039 \text{ мм} = 0,4 \text{ мкм} \quad (12)$$

Складова профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки  $\Delta_3$  визначаємо за формулою (13) при умовах:  $\varphi > \arcsin(\frac{s}{2r})$  і  $\varphi_1 \geq \arcsin(\frac{s}{2r})$

$$\Delta_3 = \frac{\left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right) \cdot \left(2S_i + \frac{r}{2} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right)\right)}{64} = 0,0001 \text{ мм} \quad (13)$$

де  $\tau_{xy}$  - динамічне напруження зсуву, МПа;  $\bar{\sigma}$  - ефективне середнє напруження в зоні стружкоутворення, МПа.

Отже, для даного випадку середні значення висоти мікронерівностей, що є результатом копіювання різального клину інструмента з урахуванням кінематичних характеристик його руху ( $\Delta_1$ ) становлять 55,5%, висоти мікронерівностей, яка визначається коливаннями різального інструменту ( $\Delta_2$ ) –

34,7% та складової профілю шорсткості, обумовленої пластичними деформаціями в зоні контакту інструмента і заготовки ( $\Delta_3$ ) – 9,8%, відповідно.

Крива залишкових напружень I роду 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 155 МПа при обробленні заготовки виштовхувача, виготовленого зі сталі 3X2B8Ф інструментом на основі CNB марки CB7025 з керамічною зв'язкою (рис.7).

Змодельовавши напружено-деформований та термодинамічний стан зони різання в системі Deform NT2, можна здійснити розрахунок залишкових напружень II роду. За розрахунками формули Аврамі-Джонсона-Мелла для сталі 3X2B8Ф (аналог H21T20821 (США)) мартенситна об'ємна фаза на поверхні заготовки становить  $\zeta_m = 0,395$  (39,5%), що заперечує виникнення на поверхні «білого шару»:

$$\zeta_m = 1 - \exp\{0,025T - 0,002315\sigma_m - 0,003314\bar{\sigma} - 5,35\} = 0,395 \quad (14)$$

Середньостатистичне значення густини  $\rho_\Sigma$  структурної фази матеріалу, сформованої в результаті впливу термодинамічних та силових чинників різання обробленої поверхні з поліфазною структурою є еквівалентним густинам різних фаз  $\rho_i$  у відповідності до їх відсоткового вмісту  $\zeta_i$ . Тоді за значення залишкового напруження II роду  $\sigma_\phi(l)$  на глибині  $l$  [мкм] їх залягання на обробленій поверхні:

$$\sigma_\phi(l) = E_M \left( 1 - \frac{\sum_i \rho_i \cdot \zeta_i(l)}{\rho_\Pi} \right) \quad (15)$$

де  $E_M=224$  — модуль Юнга сталі 3X2B8Ф, ГПа;  $\rho_\Pi = 7760$  кг/м<sup>3</sup> - густина домінуючої (перлітної) фази матеріалу деталі до її механічного оброблення.

Розраховане значення залишкового напруження II роду на поверхні деталі становить лише  $\sigma_\phi \approx 5,5$  МПа. Це є наслідком локальності і короткочасності впливу високої температури на поверхню деталі в результаті її лезового оброблення. Похибка імітаційного і розрахункового значення не перевищує в даному випадку 12,5%, що є цілком сприйнятливим для підтвердження адекватності моделювання.

Відносний показник зносостійкості  $K(I_h)$ , що характеризує зміну інтенсивності зношування в залежності від стану функціональних поверхонь, формоутворення яких відбулося внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою:

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\left[ \frac{0,6(1-\mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_1}{\sqrt{v_1}(v_1^2-1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]}{\left[ \frac{0,6(1-\mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_2}{\sqrt{v_2}(v_2^2-1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]} = \frac{\sqrt{v_2}(v_2^2-1) \cdot \lambda_1}{\sqrt{v_1}(v_1^2-1) \cdot \lambda_2} \quad (16)$$

де  $v_i$  - параметр ступеневої апроксимації кривої Аббота;  $\lambda$  - коефіцієнт, що враховує вплив поверхневих залишкових напружень на інтенсивність зношування.

Порівнюючи фінішне токарне оброблення виштовхувача прес-форми інструментом на основі CNB марки CB7025 з керамічною зв'язкою та його шліфування алмазним кругом ACB125/100 M5-2, отримуємо відносний показник зносостійкості  $K(I_h)$ :

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\sqrt{1,9}(1,9^2 - 1) \cdot 0,75}{\sqrt{1,7}(1,7^2 - 1) \cdot 1,27} = 0,86 \quad (17)$$

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.

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:

$$K(n_{-1}) = \frac{n_{-1,1}}{n_{-1,2}} = \frac{n_{BR,1} \cdot n_{eZ,1}}{n_{BR,2} \cdot n_{eZ,2}} = \frac{0,94 \cdot 1,18}{0,93 \cdot 0,83} = 1,43 \quad (18)$$

Відносний показник швидкості фретинг-корозійного руйнування  $K(\tau)$  визначається за формулою:

$$K(\tau) = \frac{\tau_{m,1}}{\tau_{m,2}} = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \frac{(Rpk_1 + Rk_1) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)}{(Rpk_2 + Rk_2) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)} = \frac{(Rpk_1 + Rk_1)}{(Rpk_2 + Rk_2)} = \frac{0,28 + 0,84}{0,43 + 0,61} = 1,07 \quad (19)$$

Відносний показник коефіцієнту надійності роботи механічної системи в режимі забезпечення рідинного трибоконтакту  $K(S)$  визначається за формулою:

$$K(S) = \frac{h_{\min,1}}{h_{\min,2}} = \frac{k_s \cdot Rvk_1}{k_s \cdot Rvk_2} = \frac{Rvk_1}{Rvk_2} = \frac{0,17}{0,18} = 0,94 \quad (20)$$

Відносний показник  $K(f)$ , що характеризує зміну коефіцієнта тертя у sprzęженій трибопарі в залежності від стану функціональних поверхонь, що утворюються внаслідок виконання різних варіантів структур і параметрів технологічного процесу, визначається за формулою:

$$K(f) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/v_1}}}}{\sqrt{\frac{R \max_2}{rb_2^{1/v_1}}}} = \sqrt{\frac{0,024}{0,096}} = 0,5 \quad (21)$$

Розрахункові значення нормалізованих локальних критеріїв оптимізації за кваліметричними показниками для фінішного токарного оброблення функціональної поверхні виштовхувача прес-форми інструментом на основі *CNV* марки *CB7025* з керамічною зв'язкою становлять 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  $Q_5 = -0,17$ . Остаточні адитивні значення інтегрального кваліметричного показника, що визначається за методикою багатокритеріальної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу (рис.9), дорівнює  $F_1 = 0,383$ . Таким чином, варіант фінішного токарного оброблення функціональної поверхні виштовхувача прес-форми інструментом на основі *CNV* марки *CB7025* з керамічною зв'язкою 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 та деформацій.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз сучасного стану технологічного забезпечення інтегрованих систем автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва показав, що традиційна методологія технологічного етапу проектування, яка базується на послідовному безітераційному синтезі операцій та переходів, потребує структурного та методологічного вдосконалення. Впровадження комплексної системи забезпечення життєвого циклу виробу (*PLM*) вимагає 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 операцій та переходів а також комплекс функціональних модулів і аналітичних додатків формування точнісних, термдеформаційних, мікрогеометричних і структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь.

2. Методологія функціонально-орієнтованого проектування базується на системі підтримки паралельного проектування (*Concurrent engineering*). При цьому, засобами паралельного інжинірингу реалізується рекурентний і ітераційний взаємозв'язок крос-функціональних етапів конструкторсько-

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 механічного оброблення на верстатах з ЧПК (CAM-система).

3. В дисертаційній роботі наведений аналіз вибору найбільш адекватних критеріїв руйнування в залежності від матеріалу деталі та умов її формоутворення, методика побудови лагранжевої та ейлерової градієнтної сітки, проаналізовані умови забезпечення її невиродження. Для реологічних моделей різання пластичних матеріалів (конструкційні сталі, дюралюміни, титаномісткі та мідномісткі сплави) рекомендується використання енергетичних критеріїв руйнування, а для різання умовно-крихких матеріалів (чавуни, силуміни, бронзи 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).

4. 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 лише геометрико-кінематичної складової мікронерівності. У зв'язку з цим, для формування функціонально-орієнтованого технологічного процесу побудована та досліджена нелінійна динамічна модель автоколивань технологічної системи, що враховує розбалансування внутрішньосистемних чинників процесу формоутворення (силових та температурних) та регенеративний механізм збудження коливань при русі інструменту по поверхні заготовки, утвореної на попередньому переході.

5. На основі аналізу результатів реологічного імітаційного моделювання процесу формоутворення, побудована методика визначення параметра деформаційної складової мікронерівності профілю обробленої поверхні деталі. При цьому був зроблений висновок про те, що величина деформаційної складової  $\Delta_3$  зростає як із збільшенням радіусу  $r$  при вершині інструменту, так і від подачі  $S$ . Зростання радіусу при вершині різального клина в 10 разів (з 0,1 до 1,0 мм) спричинює збільшення деформаційної складової мікронерівності  $\Delta_3$  при механічному обробленні заготовки зі сталі 45 лише в 2,2 рази – з 5 до 11 мкм. В той же час збільшення величини подачі з 0,05 до 0,8 мм призводить до зростання параметру  $\Delta_3$  в 7 разів (з 2 до 14 мкм). Таким чином формалізується важливий зв'язок впливу геометричних параметрів різального інструменту та режимів механічного оброблення на якісні показники мікронерівності, а відтак на забезпечення ефективних експлуатаційних параметрів виробу.

6. Розроблена в дисертаційній роботі методика дозволяє встановити величини залишкових напружень та деформацій, глибину їх залягання і закон розподілу. Залишкові напруження відображають інтерференційну картину прояву флуктаційних розтягувальних (фрикційних) та стискуючих (силових) навантажень, динамічну картину глибинних термічних впливів процесу

формування (залишкові напруження I роду) та особливості структурно-фазових перетворень, що супроводжують процес формування поверхонь (залишкові напруження II роду). Аналіз результатів імітаційного моделювання в САF-системі технологічної операції токарного оброблення деталі 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 – лише на 28% (з 80,8 МПа до 103,4 МПа). Причому найбільш інтенсивні за величиною напруження II роду знаходяться на глибині до 6 мкм, а на глибині 10 мкм майже повністю зникають.

7. Адекватність результатів імітаційного моделювання підтверджена експериментальними дослідженнями на основі акустопружного методу. Відхилення експериментальних даних залишкових напружень від змодельованих для різноманітних умов високошвидкісного фрезерування деталі з алюмінієвого сплаву AL 6061 фрезою CoroMill 300 не перевищує 11%.

8. 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 формування, реалізований в САF-системі та етапів розрахунку технологічної складової локальних критеріїв - інтенсивності зношування функціональних поверхонь, коефіцієнту запасу за показником втомної міцності, показника динамічної якості трибоспрями, коефіцієнту запасу рідинного трибоконтракту 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 формування цих поверхонь. Доведена доцільність використання відносних показників експлуатаційної якості деталей машин, що визначаються формуванням показників мікротопології оброблених поверхонь, залишкових напружень та деформацій, залежних від структури та параметрів технологічного процесу.

9. На основі аналізу результатів досліджень в САF-системі та середньостатистичних результатів експериментальних та виробничих досліджень на базовому підприємстві наведені порівняльні характеристики альтернативних варіантів фінішного оброблення виштовхувача прес-форми: токарного оброблення інструментом на основі CNB з керамічною зв'язкою 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 ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.

*Здобувачем розроблена математична модель автоколивань різального інструменту при розточуванні глибоких отворів та проведені опрацювання результатів моделювання*

2. 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.

3. Stupnytskyu V. Subsystem of rheological forming modeling in integrated CAD/CAPP/CAM system in machine building/ V.Stupnytskyu // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика».- 2012.- №747.– С.139-142.

4. Stupnytskyu V. New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering / V.Stupnytskyu // Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing.- Stuttgart, 2012.- № 1.- P.327-329.

5. 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.

6. 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.

7. 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». - 2012.- №730.– С.125-129.

8. 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".- 2012.- №46.– С.141-144.

9. Ступницький В.В. Математичне моделювання автоколивань різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні / В.В.Ступницький, Я.М.Новицький // Машинознавство. - 2013. — №1-2 (187-188).- С.19-22.

*Здобувачем розроблені математична та імітаційна модель автоколивань різального інструменту під час механічного оброблення виробу*

10. 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».-2013.- Вип.№ 3.– С.133-140.

11. 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

12. Ступницький В.В. Використання САF-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.

13. 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.- P.50-53.

14. 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.

15. 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». - 2013.- №759.- С.119-126.

16. 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.

17. 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”.- 2013.- №772.- С.102-114

18. 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.

19. 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 «Вісник Гродзенскага Дзяржаўнага Ўніверсітэта імя Янкі Купалы», Гродно, 2013.- №3(158).- Серия 6.- С.76-86.

20. 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». –2013. – Вип. №42. – С.305-313.

*Здобувачем розроблена математична модель триботехнічного критерію формування функціонально-орієнтованої технології виготовлення деталей*

21. 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

22. 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

23. Stupnytskyu V. Determination of Deformation Component Roughness Parameters Using the Methods of Rheological Simulation Modeling of the Cutting Process / V.Stupnytskyu, 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.

*Здобувачем розроблена математична модель формування деформаційної складової мікронерівності профілю та проведені дослідження результатів імітаційного моделювання*

24. Stupnytskyu V. A Generalized Example of Structural and Parametric Optimization of Functionally-Oriented Process / V.Stupnytskyu // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 42 (1085).-С.116-130.

25. 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, 2014.- №2 (48).- С.109-120.

26. 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.

27. 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.- Харків: НТУ «ХПІ».- 2014.- Вип.№9.- С.98-110.

*Здобувачем розроблена імітаційна реологічна модель формоутворення виробу для дослідження залежності напружено-деформованого стану заготовки від геометрії різального інструменту*

28. 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, 2014. - Вип. №34.- С. 9–18.

29. Ступницький В.В. Дослідження процесів наростоутворення та зношування різального інструмента за допомогою реологічного моделювання процесу різання / В.В. Ступницький, Я.В. Долиняк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ».- 2015. – № 4 (1113). – С.177-180.

*Здобувачем розроблені моделі наростоутворення та зношування різального інструмента та проведені дослідження впливу цих чинників на формування напружено-деформованого стану оброблюваної поверхні виробу.*

30. Ступницький В.В. Дослідження залишкових деформацій, що формуються в результаті виконання технологічного переходу лезового оброблення деталі на основі імітаційного моделювання процесу різання / В.В.Ступницький / Різання та інструмент в технологічних системах – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – Вип. 85. – С. 274-281.

## АНОТАЦІЯ

**Ступницький В. В. Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами паралельного інжинірингу.** –Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2015.

У дисертації розроблені науково-прикладні засади забезпечення комплексних показників експлуатаційної якості деталей машин на основі впровадження методології функціонально-орієнтованого проектування технологій механічного оброблення машинобудівних виробів засобами паралельного інжинірингу. Створено методичне та алгоритмічне забезпечення автоматизованої підсистеми формоутворення виробів в складі інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва. Розроблено наукові основи імітаційного моделювання технологічних операцій і переходів та комплекс функціональних модулів та аналітично-прикладних програм формування точнісних, термічно-деформаційних, мікрогеометричних та структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь. Поставлено та розв'язано задачу 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.

**Ключові слова:** функціонально-орієнтований технологічний процес, життєвий цикл виробу, деформація, руйнування, шорсткість, залишкові напруження, метод скінчених елементів, структурно-параметрична оптимізація.

## АННОТАЦИЯ

**Ступницький В. В. Научно-прикладные основы проектирования функционально-ориентированных технологий машиностроения средствами параллельного инжиниринга.** - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 - технология машиностроения. - Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы - разработке научно-прикладных основ обеспечения комплексных показателей эксплуатационного качества деталей машин путем внедрения методологии функционально-ориентированного проектирования технологий механической обработки машиностроительных изделий средствами параллельного инжиниринга.

Обеспечение основных эксплуатационных свойств изделия (износостойкости, усталостной прочности, маслостойкости и антикоррозионных свойств функциональных поверхностей и т.п.) в значительной мере обуславливается не только назначенными конструктором нормами точности и качества отдельных поверхностей изделия, но и такими важными факторами, как микротопология поверхностей, остаточные

напряжения и деформации поверхностного слоя и тому подобное. Но формирование этих характеристик изделия зависит от структуры и параметров технологического процесса его изготовления и не может быть априорно пронормировано конструктором. Поэтому без реализации рекуррентных связей технологического этапа подготовки производства с предыдущими этапами конструкторского и инженерного анализа невозможно учесть влияние структуры и параметров операций и переходов на формирование квалиметрических показателей работы изделия в целом. Системный принцип реализации жизненного цикла продукции требует непосредственной связи технологического этапа с эксплуатационным этапом, а не только их опосредованной связи через обеспечение условий и ограничений, сформулированных на конструкторском этапе. Этим обеспечивается принцип параллельного инжиниринга в модернизированной *PLM*-системе (*Product Life Management*). Поэтому копирование общепринятого алгоритма технологического проектирования существенно ограничивает потенциал интегрированной автоматизированной конструкторско-технологической системы подготовки машиностроительного производства. Таким образом, для комплексного обеспечения жизненного цикла машиностроительной продукции (*PLM*-системы) является актуальным создание и внедрение научных и прикладных основ проектирования функционально-ориентированных технологий (ФОТ). Главной особенностью ФОТ является то, что первичным в формировании структуры и параметров технологических операций и переходов является обеспечение средствами параллельного инжиниринга комплекса функционально-эксплуатационных свойств изделия при соблюдении заданных конструктором параметров точности и качества поверхностей, ресурса работы, а также организационных и технико-экономических ограничений.

Методология функционально-ориентированного проектирования основана на системе параллельного инжиниринга *CAPE* (*Concurrent Art-to-Product Environment* - система поддержки параллельного проектирования (*Concurrent engineering*)) с параметрическими связями между элементами моделей, узлов и программными модулями. Многослойность цифровой модели изделия и координационные функции *CAPE*-системы позволяют существенно сократить цикл создания изделия, повысить технический уровень проектов, избежать нестыковок и ошибок в результате взаимосвязи и контролируемости информации на всех стадиях технологического проектирования.

Особенностью внедрения функционально-ориентированных технологий для эффективной реализации методологии *PLM* в машиностроении на основе принципа параллельного проектирования является использование *CAF*-системы (*Computer Aided Forming*). В основе этой системы положен анализ имитационной реологической модели отдельных технологических переходов и комплекс функциональных модулей и аналитических приложений формирования точностных, термдеформационных, микрогеометрических и структурно-фазовых параметров обрабатываемых поверхностей. *CAF*-система органично дополняет существующий интегрированный комплекс *CAD/CAE/CAPP/CAM* систем, обеспечивая прогностическую возможность имитационного моделирования и установления зависимости основных квалиметрических показателей изделия от структуры и параметров технологического процесса механической обработки детали.

Базовая методология построения функционально-ориентированного технологического процесса предусматривает решение ряда проблем, связанных с адекватным имитационным моделированием напряженно-деформированного состояния деталей в процессе их формообразования. В соответствии с обобщенным алгоритмом функционирования САF-системы, результаты анализа напряженно-деформированного состояния поверхностей в процессе их формообразования позволяют осуществить моделирование микротопологии поверхностей, остаточных напряжений и деформаций, а также - сформировать прогностические связи между структурой и параметрами технологического процесса обработки деталей и доминирующими эксплуатационными свойствами деталей (обеспечение износостойкости, усталостной прочности, коррозионной стойкости, триботехнических показателей качества подвижных соединений и т.п.).

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований решена важная научно-прикладная задача технологического проектирования операций механической обработки машиностроительных изделий на основе прогностических результатов анализа имитационного моделирования напряженно-деформированного и термодинамического состояния детали в процессе формообразования функциональных поверхностей этих изделий. При этом впервые разработаны научные основы проектирования функционально-ориентированных технологических процессов, что позволило создать концепцию системного обеспечения комплекса эксплуатационных показателей машиностроительных изделий.

**Ключевые слова:** функционально-ориентированный технологический процесс, жизненный цикл изделия, деформация, разрушение, шероховатость, остаточные напряжения, метод конечных элементов, структурно-параметрическая оптимизация.

## SUMMARY

**Stupnytskyy V.V. Scientific and Applied Basics of the Functionally-Oriented Engineering Technology Planning by the Concurring Engineering Methods. - Manuscript.**

Thesis for doctor degree in technical sciences by speciality 05.02.08 - technology engineering. - National University "Lviv Polytechnic", Lviv, 2015.

The scientific and applied principles which provide complex indexes of operational quality machine parts based implementation methodology functionally-oriented design of machining technology of concurrent products engineering in thesis developed. A methodical and algorithmic support of the automated subsystems forming products as part of an integrated system of design and technological machine production process engineering. The scientific basis of manufacturing operations simulation and complex transitions and functional modes and analytical applications accuracy formation, thermally and deformation, mikrogeometrical and structural phase parameters of machined surfaces. Set and solved the problem of multi-objective optimization function-oriented process by calculating integral qualimetric index, which systematically describes the wear resistance, fatigue strength, corrosion resistance most loaded surfaces of the product obtained as a result of the formation process of microstructure surface layer forming, residual stresses and strains.

**Keywords:** function-oriented process, product life cycle, deformation, fracture, roughness, residual stress, finite element method, structural and parametric optimization.