

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

Кусий Ярослав Маркіянович

УДК 658.511.4:621.7

**НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ
ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСПАДКУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ЯКОСТІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВИРОБІВ**

05.02.08 – Технологія машинобудування

Галузь знань 13 – механічна інженерія

131 – Прикладна механіка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, доцент
Ступницький Вадим Володимирович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри робототехніки та інтегрованих
технологій машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Залога Вільям Олександрович,
Сумський державний університет,
професор кафедри технології машинобудування,
металорізальних верстатів та інструментів

доктор технічних наук, професор
Марчук Віктор Іванович,
Луцький національний технічний університет,
професор кафедри прикладної механіки та
мехатроніки

доктор технічних наук, доцент
Роп'як Любомир Ярославович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти та газу,
професор кафедри комп'ютеризованого
машинобудування

Захист відбудеться 27 вересня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці за адресою: 79013, Львів, вул. Професорська, 1 та на сайті Національного університету «Львівська політехніка» в розділі «Наука».

Автореферат розісланий « » серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.06,
кандидат технічних наук, доцент

Ю. П. Шоловій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для сучасного машинобудування першочергового значення набуває підвищення конкурентоздатності продукції в умовах ринкових відносин, технологічне забезпечення параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності для запобігання відмовам або переходу в граничний стан машинобудівних виробів унаслідок невідновних процесів деградації матеріалу.

Показники надійності та пов'язані з ними експлуатаційні характеристики виробів забезпечуються під час їхнього виготовлення реалізацією технологічних маршрутів оброблення поверхонь окремих деталей згідно з двома основними принципами проектування технологічних процесів: об'єктно- та функціонально-орієнтованим.

Принцип об'єктно-орієнтованого проектування (ООП) під час виготовлення виробів передбачає покрокове виконання взаємопов'язаних етапів із використанням типових технологічних процесів (ТП). Після кожного технологічного переходу відбувається уточнення параметрів якості визначеної поверхні згідно з принципом технологічного успадковування для забезпечення вимог конструкторсько-технологічної документації. Критерієм оптимізації під час вибору раціонального варіанту технологічного процесу є мінімальна технологічна собівартість виготовлення виробу без функціонального аналізу його експлуатаційних характеристик, покладаючись на досвід, кваліфікацію та технічний рівень конструктора.

Принцип функціонально-орієнтованого проектування (ФОП) ТП характеризується технологічним забезпеченням найефективніших експлуатаційних характеристик деталей машин із дотриманням призначених конструктором параметрів точності та якості поверхневого шару їхніх робочих поверхонь.

Для принципу ФОП ТП умови експлуатації мають пріоритетний вплив на формування технологічних маршрутів оброблення поверхонь виробів та забезпечення параметрів їхньої якості згідно з технічними вимогами. Під час експлуатації вироби піддаються комплексному впливу зовнішніх чинників, серед яких знос є домінуючим видом пошкодження більшості машин, їхніх механізмів і деталей. Зокрема, виконавчі (функціональні) поверхні деталей різних класифікаційних груп силових передач (вали, важелі, втулки, напрямні тощо) працюють в умовах інтенсивного зношування. За таких умов експлуатації необхідною умовою працездатності виробу є технологічне забезпечення структурної однорідності поверхневого шару функціональних поверхонь.

Розроблення методологічного підходу до визначення параметрів якості виконавчих (функціональних) поверхонь під час виготовлення деталей і аналізу процесу технологічного успадковування для забезпечення експлуатаційних характеристик відповідно до призначення та регламентованих показників надійності є актуальною науково-прикладною проблемою в технології машинобудування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі робототехніки та інтегрованих технологій

машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» відповідно до наукового напрямку «Динаміка, міцність та надійність механічних систем, автоматизація виробництва і технічна діагностика обладнання. Розроблення високоефективних технологічних процесів механічної обробки, складання та їх автоматизація». Отримані результати використано в таких науково-дослідних роботах: спільному українсько-словацькому гранту «Розроблення методів вібраційного поверхневого оброблення виробів та керування віброактивністю технологічних машин» (2006–2007 рр., договір № М/178-2006 р.), де автор був відповідальним виконавцем; «Дослідження динамічних процесів вібраційних технологічних систем» (2017–2021 рр., № держреєстрації 0117U004472), де автор є відповідальним виконавцем; «Дослідження впливу вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри якості та показники надійності виробів» (2019–2021 рр., № держреєстрації 0118U007055), де автор є керівником проєкту.

Тема узгоджується із «Концепцією Загальнодержавної цільової економічної програми розвитку промисловості на період до 2020 року» (розпорядження КМУ від 17.07.2013 р. № 603-р), «Деякими питаннями визначення середньострокових пріоритетних напрямів інноваційної діяльності загальнодержавного рівня на 2017–2021 роки» (затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 28 груд. 2016 р. № 1056) і спрямована на впровадження ресурсощадних ефективних технологій із можливістю керування ними на важливих етапах і стадіях життєвого циклу машинобудівного виробу.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає у розробленні науково-прикладних основ аналізу процесів технологічного успадковування параметрів виробів за гомогенністю (однорідністю) їхнього матеріалу під час проєктування оптимальної структури технологічних процесів виготовлення деталей машин для підвищення експлуатаційних характеристик і показників надійності.

Для досягнення поставленої в дисертаційній роботі мети потрібно розв'язати такі завдання:

1. На основі аналізу сучасного стану проблеми технологічного успадковування параметрів якості машинобудівних виробів встановити науково обґрунтовані напрямки технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності об'єктів машинобудівного виробництва.

2. Встановити показники, які характеризують гомогенність матеріалу під час виготовлення деталей машин та можуть бути застосовані в нових методиках проєктування технологічних маршрутів оброблення поверхонь для забезпечення параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів.

3. Розробити методику проєктування технологічних маршрутів оброблення виконавчих (функціональних) поверхонь машинобудівних виробів, які працюють в умовах силового навантаження та інтенсивного зношування, із використанням показників аналізу технологічного успадковування параметрів деталей машин за ступенем деградації їхнього матеріалу.

4. Визначити та реалізувати взаємозв'язки та закономірності у підсистемі аналізу технологічного успадковування за характеристиками матеріалу виробу, як елемента підсистеми аналізу технологічного успадковування під час його

формування, у складі інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва.

5. Розробити взаємозв'язки та встановити закономірності у підсистемі модифікування поверхні за поверхневого пластичного деформування, що формується внаслідок взаємозв'язків підсистем поверхневого пластичного деформування, аналізу процесу модифікування поверхневого шару виробу та технологічного успадковування під час формування виробу.

6. Провести експериментальні дослідження застосування принципу ФОП під час виготовлення втулок циліндрових бурових pomp із використанням методу вібраційно-відцентрового оброблення та розробити технологічне оснащення для його реалізації.

7. Провести дослідження технологічного забезпечення параметрів якості виробів, що формуються у результаті технологічного успадковування в технологічній системі «металорізальний верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)», для аналізу технологічних операцій та технологічних процесів виготовлення деталей машин.

8. Удосконалити методику проектування технологічних процесів за параметрами досягнення необхідної точності оброблення заготовок із забезпеченням ефективності їхнього виготовлення.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси, що розроблені за принципом функціонально-орієнтованого проектування для виготовлення деталей машин, які працюють в умовах силового навантаження та інтенсивного зношування.

Предмет дослідження – технологічне успадковування параметрів якості деталей машин, виготовлених за принципом функціонально-орієнтованого проектування.

Гіпотеза полягає в існуванні критерію для аналізу технологічного успадковування параметрів якості виробів, який характеризує зміну гомогенності (однорідності) матеріалу за розсіюванням характеристик твердості поверхневого шару деталей машин, для розроблення раціональних технологічних маршрутів оброблення їхніх поверхонь і технологічних процесів виготовлення об'єктів машинобудівного виробництва під час реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування.

Методи дослідження. Під час виконання дисертаційної роботи застосовано сучасні методи теоретичних, модельних та натурних досліджень. Теоретичні дослідження базувалися на основних положеннях статистичних теорій міцності, методології функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів, теорії технічних систем, теорії надійності, теорії ймовірності, математичній статистиці та методах планування експерименту. Метод LM-твердості використано для розроблення раціональної структури технологічного маршруту оброблення поверхонь виробів, аналізу технологічного успадковування матеріалу. При математичному моделюванні впливу елементів технологічного середовища «верстат – пристрій – інструмент» на забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі використано математичний апарат опису марковських процесів зі складанням і розв'язком систем диференціальних рівнянь

Колмогорова–Чепмена. Розв’язки рівнянь і автоматизацію інженерних розрахунків здійснено у середовищі Mathcad.

Експериментальні дослідження розсіювання твердості матеріалу зразків виробів проведено на стаціонарному приладі TP-5006 методом Роквелла і на переносному твердомірі ТД-42 фірми «Ультракон» методом Брінеля за стандартними методиками. Мікроструктурні дослідження інтенсивності (густини) технологічних дефектів у поверхневому шарі зразків здійснено на електронному мікроскопі ZEISS EVO 40XVP. Вимірювання параметрів шорсткості втулок циліндрових бурових pomp НБ-32 проведено за допомогою вимірної комплексу, який складався з профілографа-профілометра, пристрою узгодження, аналогово-цифрового перетворювача та комп’ютерної програми «Roughness Plot Analyzer» для опрацювання та представлення результатів експериментальних досліджень. Оброблення експериментальних зразків проведено як на універсальному обладнанні з використанням універсальних металорізальних інструментів, так і на сучасному вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL із застосуванням кінцевих фрез фірми «Sandvik».

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

1. Отримала подальший розвиток методологія функціонально-орієнтованого проєктування при виготовленні машинобудівних виробів на основі аналізу процесів технологічного успадковування властивостей матеріалу оброблених поверхонь на етапах технологічного процесу.

2. Вперше запропоновано для аналізу технологічного успадковування параметрів якості під час виготовлення деталей використовувати критерій однорідності матеріалу, що комплексно враховує зміни властивостей поверхневого шару та параметрів якості поверхонь.

3. Науково обґрунтовано показники, що корелюють зі структурним станом обробленого матеріалу машинобудівного виробу та визначають параметр однорідності його структури за ступенем розсіювання характеристик твердості після механічного оброблення.

4. Вперше розроблено структуру та методичне забезпечення системи аналізу формоутворення виробу із врахуванням технологічного успадковування його параметрів якості.

5. Науково обґрунтовано гіпотезу про те, що впорядкованість структури заготовок із алюмінієвих сплавів відповідає стану структурно-однорідного, а сталевих заготовок – структурно-неоднорідного матеріалу за ступенем розсіювання характеристик твердості, який визначається коефіцієнтами гомогенності Вейбулла. Встановлено, що структурна неоднорідність заготовок сталевих деталей зменшується почерговими чорновими, чистовими та фінішними методами оброблення за збільшення коефіцієнта гомогенності Вейбулла у 2,8–56,2 рази, заготовок із алюмінієвих сплавів – напівчистовими та чистовими методами технологічного оброблення за збільшення коефіцієнта гомогенності Вейбулла на 49,4–60,2 % .

6. Отримала подальший розвиток методологія функціонально-орієнтованого проєктування технологічних процесів виготовлення виробів під час реалізації

комбінованих методів оброблення із використанням вібрацій та модифікування поверхневого шару твердим сплавом.

7. Вперше розроблено теоретико-експериментальний підхід для системного забезпечення регламентованих параметрів надійності виробів, що враховує вплив елементів технологічної системи під час успадковування параметрів якості після механічного оброблення на всіх етапах технологічного процесу.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено методику визначення параметрів заготовки після етапу заготівельного виробництва за характеристиками гомогенності матеріалу, що використовується для контролю ступеня невідповідності його структури та подальшого проектування технологічного маршруту оброблення поверхонь деталей машин для принципів об'єктно- та функціонально-орієнтованого проектування ТП.

2. Запропоновано методику проектування структури технологічних маршрутів механічного оброблення виконавчих поверхонь деталей машин, яка ґрунтується на узагальненому методологічному підході щодо оптимізації вибору методів і послідовності технологічних оброблень за критерієм гомогенності матеріалу для оцінки технологічного успадковування параметрів виробів. Застосування цієї методики підвищує необхідні експлуатаційні характеристики, забезпечує регламентовані показники надійності об'єктів машинобудівного виробництва та використовується для деталей машин, які працюють в умовах силового навантаження та інтенсивного зношування.

3. Розроблено метод розрахунку показників надійності заготовок виробів і елементів технологічного середовища «верстат – пристрій – інструмент» на технологічних переходах і технологічних операціях, за результатами яких визначаються ймовірності забезпечення параметрів деталей машин під час технологічного успадковування з урахуванням принципів об'єктно- та функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів.

4. Удосконалено технологічний процес виготовлення втулок циліндрових бурових pomp НБ-32, адаптовано технологічне обладнання об'ємного вібраційного оброблення для реалізації методу вібраційно-відцентрового оброблення деталей форми тіл обертання та розроблено експериментальний зразок технологічного оснащення, що забезпечує підвищення експлуатаційних характеристик і ресурсу машинобудівних виробів.

5. Впроваджено такі результати дослідження:

— технологічний процес виготовлення втулок циліндрових бурових pomp НБ-32 за принципом ФОП ТП, що дозволило підвищити їхній ресурс, зменшити загальну працездатність і собівартість виготовлення одиниці продукції на ПП «Техноресурс» (м. Калуш Івано-Франківської обл.);

— методику проектування раціональних технологічних маршрутів оброблення виконавчих поверхонь сталевого вала 6Е4-2717.00.00.01 на ТзОВ «Транссистем» (м. Львів);

— методику проектування раціональних технологічних маршрутів оброблення поверхонь кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса на ТзОВ «ІнтерПЕТ» (м. Львів);

— прикладні програми, алгоритми розрахунку, математичне моделювання технологічних процесів виготовлення деталей машин на кафедрі робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Інституту механічної інженерії та транспорту Національного університету «Львівська політехніка» для навчання студентів за спеціалізацією 131.3 «Технології машинобудування» спеціальності 131 «Прикладна механіка» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Особистий внесок здобувача. Основні науково-практичні результати досліджень, які наведені в дисертації, отримані автором особисто. У спільних наукових роботах авторові належать: розроблення технологічного забезпечення параметрів якості поверхонь виробів у їхніх життєвих циклах [3, 5, 19, 24, 35, 37, 40, 41, 49]; дослідження технологічного успадковування виробів під час реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування за критерієм однорідності (гомогенності) матеріалу [2, 15, 16, 39, 42, 44, 45]; аналіз впливу технологічних режимів вібраційно-відцентрового оброблення (зміцнення) на параметри якості поверхневого шару та показники надійності виробів [1, 7–11, 13, 18, 28, 30, 32, 34, 46–48, 52]; розроблення методики визначення раціонального припуску за критерієм однорідності матеріалу виробів [6]; дослідження впливу маршруту оброблення заготовок деталей машин на формування технологічної пошкоджуваності матеріалу [14, 17, 20–23, 25–27, 29, 31, 36, 38, 43, 50]; дослідження впливу концентраторів напружень у виливках на формування технологічних пошкоджень за критерієм однорідності матеріалу [4, 12, 33, 51, 53]. Формування проблеми, постановку основних завдань досліджень, опрацювання висновків здійснено спільно з науковим консультантом.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на конференціях: X (2010), XII (2012) Міжнародних Промислових конференціях «Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах» (сmt. Славське, Україна), IX (2009), XII (2015), XIII (2017) Міжнародних симпозіумах українських інженерів-механіків (м. Львів, Україна), VI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів/Звенів, Україна, 2017), VII Міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів – Звенів (Карпати), 2018), VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Івано-Франківськ – Яремче (Карпати), 2019), IX International conference on applied sciences (Humedora, Romania, 2019), 19th International conference «Thermal science and engineering of Serbia» /SIMTERM-2019 (Sokobanja, Serbia, 2019), Міжнародній конференції «Перспективи розвитку сучасної науки та освіти» (Львів, 2019), III Міжнародній науково-практичній конференції «Пріоритети сучасної науки» (Київ, 2019), Міжнародній науково-практичній конференції «Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності» (Львів, 2019), Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти» (Львів, 2020), V Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти розвитку науки» (Київ, 2020), VII International Scientific and Practical Conference «Goal and role of world science in modernity» (Helsinki, Finland, 2020).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 53 публікаціях, з яких: 3 – у наукових періодичних виданнях інших держав; 5 статей – у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включені до БД SCOPUS; 5 – у міжнародних і вітчизняних виданнях, внесених до інших міжнародних наукометричних баз; 11 публікацій у наукових фахових виданнях України (з них 2 одноосібні); 29 публікацій тез конференцій та симпозіумів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел із 320 найменувань на 32 сторінках. Основний зміст дисертації викладено на 340 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 432 сторінки; з них 72 рисунки та 36 таблиць по тексту, а також додатки на 92 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано тему дослідження та науково-прикладну проблему для розв'язання, висвітлено її зв'язок із державними науковими програмами, планами та темами кафедри. Сформульовано мету та завдання дослідження, окреслено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проаналізовано основні види відмов об'єктів машинобудівного виробництва та встановлено, що малодослідженими є відмови деталей машин, які пов'язані із еволюцією технологічних дефектів і технологічним успадкуванням.

Дослідженню явищ технологічного успадкування в машинобудуванні та механообробці присвячені роботи А. М. Дальського, П. І. Ящерицина, Е. В. Рижова, їхніх учнів і послідовників.

Під технологічним успадкуванням у технології машинобудування розуміють явище перенесення властивостей заготовок деталей від попередніх технологічних операцій (ТО) (в рамках ТП) і технологічних переходів (у рамках ТО) до наступних під час їхнього виготовлення методами лезової, абразивної обробок, термооброблення, оброблення тиском тощо, що визначає умови формування експлуатаційних властивостей та показників надійності виробів. Збереження цих властивостей у деталях машин називають технологічною спадковістю. Технологічне успадкування слугує узагальненим показником для визначення технологічного успадкування (процесу) та технологічної спадковості (характеристики) машинобудівного виробу.

На сучасному етапі розвитку технології машинобудування більшість досліджень стосується технологічного успадкування під час механічного оброблення та складання виробів.

Носіями інформації про технологічне успадкування є властивості матеріалу та параметри якості поверхневого шару деталей машин, що поступово змінюються на проміжних етапах технологічного ланцюжка «вхідна заготовка – готова деталь» під впливом економічно обґрунтованої послідовності технологічних операцій.

За результатами сучасних досліджень технологічного успадкування параметрів якості виробів встановлено, що під час їхнього виготовлення аналізують або ступінь деградації матеріалу за багаточисельними критеріями руйнування в переважній більшості після оброблення тиском, або досліджують вплив параметрів

якості поверхневого шару деталей машин на формування їхніх експлуатаційних характеристик після механічного оброблення.

Основний внесок у розвиток теорії механіки пошкодження деталей машин внаслідок деградації їхнього матеріалу зробили Л. М. Качанов, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородніков, Ю. М. Работнов, Г. О. Смірнов-Аляєв, С. Мураками, В. Твергаард та багато інших науковців.

Упродовж останніх років інтенсивно проводяться дослідження в межах нового етапу розвитку технології машинобудування, пов'язаного із розробленням наукових основ системного проєктування технологічних процесів обробки виробів з найефективнішими експлуатаційними властивостями для реалізації принципу ФОП ТП. Наукові досягнення у цьому напрямку висвітлено у роботах В. А. Валєтова, В. В. Васильківа, Д. В. Василькова, Я. В. Васильченко, Ю. М. Внукова, А. І. Грабченка, І. Є. Грицяя, Ю. М. Данильченка, В. О. Залози, В. О. Іванова, В. В. Кальченка, Г. В. Канашевича, С. В. Ковалевського, В. Д. Ковальова, Л. Г. Козлова, П. М. Мазура, О. М. Михайлова, О. Р. Ониська, О. А. Оргіяна, В. Г. Панчука, В. А. Пасічника, О. А. Пермькова, Ю. В. Петракова, М. І. Пилипця, Л. Я. Роп'яка, В. В. Ступницького, А. Г. Суслєва, В. М. Тонкононого, М. Йошімури, Ф. Клоке, Дж. Сміта та інших.

Значних здобутків у дослідженні впливу структури технологічних процесів, геометричних і фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару деталей машин на формування домінуючих експлуатаційних характеристик (зносоустійкості, втомної міцності, тримкої здатності, корозійної стійкості тощо) і показників надійності виробів досягнули В. С. Антонюк, І. С. Афтаназів, В. Ф. Без'язичний, Ю. Р. Віттенберг, Л. А. Галін, І. В. Гурей, А. М. Дальський, М. Б. Дьомкін, С. А. Клименко, Б. І. Костецький, І. В. Крагельський, Я. М. Литвиняк, В. І. Марчук, А. А. Маталін, Н. В. Олійник, Е. К. Посвятенко, Я. А. Рудзіт, А. Г. Суслєв, Я. С. Фельдман, Ю. Г. Шнейдер, П. І. Ящеріцин та інші. Запропоновані у наукових працях математичні моделі та критерії формалізації процесів формування технологічних дефектів під час механічного оброблення та їхньої трансформації у пошкодження за несприятливих умов експлуатації розроблені, як правило, для принципу ООП ТП і потребують подальших досліджень для ФОП ТП.

Запропоновані в дисертаційній роботі дослідження спрямовано на подальший розвиток наукових результатів сформованої у Національному університеті «Львівська політехніка» і НДЛ-40 львівської школи вібраційного оброблення для технологічного забезпечення виробничих процесів. Серйозною проблемою у застосуванні ефективного вібраційного обладнання великосерійного та масового виробництва машинобудівної продукції є необхідність його адаптації під вимоги характерного для сучасного машинобудування одиничного і дрібносерійного виробництва.

Обґрунтовано недосконалість традиційних підходів стосовно технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик деталей машин під час механічного оброблення, оброблення тиском і потребу подальших теоретико-експериментальних досліджень. Встановлено, що пошкоджуваність/пошкодженість виробів порушує гомогенність поверхневого шару їхнього матеріалу та визначає ступінь його

деградації. Пошкоджуваність/пошкодженість деталей машин аналізується моделями Пальмгрена–Майєра, Качанова–Работнова, Гріффітса та їхніх послідовників за зміною абсолютних значень фізичних величин. Вона визначається тривалістю фізико-хімічних процесів, які супроводжують стадії життєвих циклів машинобудівних виробів.

Поряд із традиційними моделями для аналізу однорідності матеріалу виробів за ступенем його пошкодженості на стадії їхньої експлуатації застосовують метод LM-твердості, який розроблений у Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України під керівництвом академіка А. О. Лебедева. Згідно з цим методом, ступінь однорідності структури матеріалу, яку аналізують за величиною параметрів закону розподілу, безпосередньо пов'язана зі ступенем розсіювання характеристик механічних властивостей матеріалу. Цей метод найпростіше реалізувати, використовуючи як механічну характеристику твердість H , значення якої застосовують для непрямої оцінки зміни властивостей матеріалу за коефіцієнтом гомогенності у розподілі Вейбулла (m) – $m=f(H_1, H_2, \dots)$.

Вияснено, що за методом LM-твердості аналізують стан поверхні визначеного виробу після пластичного деформування або під час його експлуатації. Для фізико-механічних властивостей іншого матеріалу за зміни номенклатури виробів ступінь деградації поверхневого шару після оброблення тиском або напрацювання буде іншим.

Встановлено, що твердість поряд з іншими фізико-механічними характеристиками матеріалу визначається на макро-, мікро- та субмікрорівнях та інтерпретується як макротвердість (твердість), мікротвердість і нанотвердість. Водночас, напрацювання виробу незначно змінює твердість на всіх рівнях, підвищуючи або знижуючи її. Однак, якщо значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), що характеризує ступінь однорідності матеріалу, за результатами вимірювання твердості однозначно зменшується після визначених напрацювань, то при вимірюваннях мікро- та нанотвердості цей показник практично не змінюється.

Встановлено, що особливістю впровадження принципу ФОП ТП для ефективної реалізації методології PLM (Product Lifecycle Management) в машинобудуванні на основі принципу паралельного проектування є використання автоматизованої системи аналізу формоутворення (CAF-системи). Однак CAF-систему розроблено лише загалом для методів обробки різанням під час виготовлення машинобудівних виробів за допомогою імітаційного реологічного моделювання процесу їхнього формоутворення, а вдосконалення її структури та розроблення для інших технологічних методів оброблення потребує подальших ґрунтовних досліджень.

Зростання вимог до регламентованих параметрів виробів вимагає пошуку, розроблення та впровадження нових критеріїв та їхніх показників (характеристик) для аналізу технологічного успадковування під час проектування раціональної структури технологічних процесів і виготовлення деталей машин.

У **другому розділі** науково обґрунтовано показники, які покладені в основу узагальненого методологічного підходу аналізу процесів технологічного

успадковування параметрів якості деталей машин для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик за критерієм однорідності (гомогенності) матеріалу.

Розроблено концептуальну модель ТП, що відповідає поєднанню принципів ООП і ФОП проєктування, тобто функціонального-орієнтованого (гібридного) технологічного процесу (рис. 1).

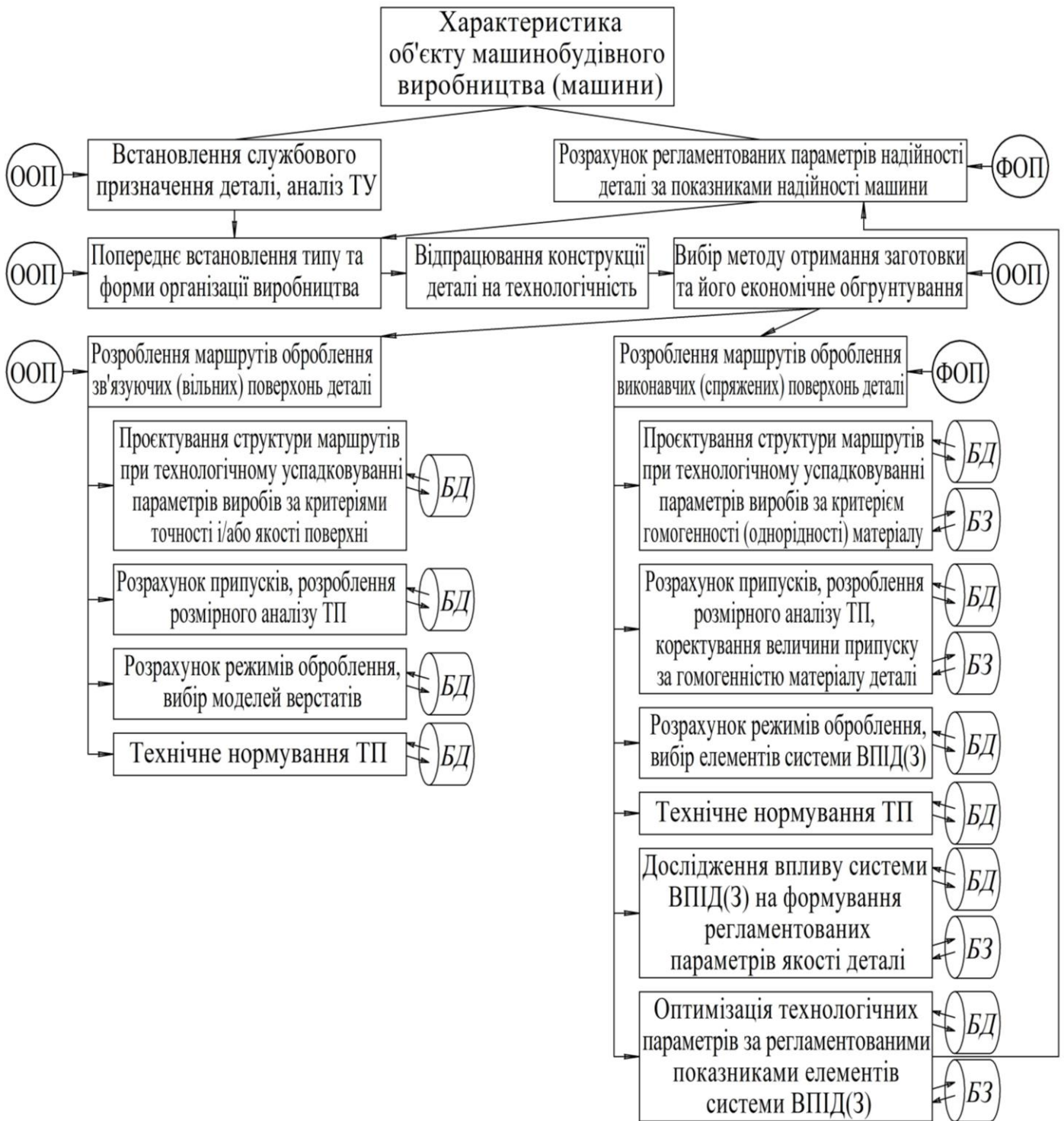


Рис. 1. Концептуальна модель розроблення технологічного процесу виготовлення деталі із використанням принципів об'єктно- і функціонально-орієнтованого проєктування

Технологічні процеси виготовлення деталей машин, що не мають важливих виконавчих (функціональних) поверхонь, доцільно проектувати повністю за алгоритмом об'єктно-орієнтованого технологічного проектування та критерієм мінімальної собівартості виготовлення виробів.

Під час розроблення ТП виготовлення визначеної деталі, пріоритетне місце займає реалізація принципу ФОП з огляду на забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів при виконанні ними службового призначення.

Розроблення структури технологічних маршрутів оброблення поверхонь виробів за принципом ООП із врахуванням технологічного успадковування передбачає підвищення квалітетів точності від заготовки до деталі або уточнення параметрів шорсткості після чорнових, чистових та фінішних переходів і операцій під час забезпечення лише регламентованих параметрів якості деталей.

Забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів під час формування структури маршрутів оброблення виконавчих поверхонь за принципом ФОП вимагає не лише врахування параметрів точності, якості поверхонь і поверхневого шару, а й комплексу властивостей матеріалу, які змінюються під дією технологічних обробок.

Тому для аналізу технологічного успадковування за принципом ФОП при механічному обробленні широкої номенклатури деталей із різних матеріалів необхідно визначити характеристики матеріалу, які пов'язані зі структурно-чутливим параметром – коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m).

Гомогенність матеріалу, за методом ЛМ-твердості, розробленого академіком А. О. Лебедевим, в роботі запропоновано використовувати як параметр для аналізу технологічного успадковування характеристик поверхонь виробів після їхнього механічного оброблення, який інтегрально характеризує стан матеріалу після опрацювання результатів вимірювань твердості.

Числове наповнення концептуальних моделей здійснено на основі напрацювань академіка А. О. Лебедева та його школи.

Працездатність деталей машин визначається умовами та особливостями їхньої роботи до настання граничного стану матеріалу, що забезпечується експлуатаційними характеристиками та регламентованими показниками надійності об'єктів виробництва.

Критерій міцності під час розрахунків граничного стану матеріалу деталей машин визначається нерівністю:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, a_i) \leq \sigma_{екв.}, \quad (1)$$

де $\sigma_{екв.}$ – еквівалентне напруження для вибраного критерію міцності; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження; a_i – константи матеріалу.

Руйнування матеріалу описується сукупною дією дотичних і нормальних напружень, що враховується об'єднаним критерієм Писаренко–Лебедева:

– для структурно-однорідного матеріалу

$$\chi \cdot \sigma_i + (1 - \chi) \cdot \sigma_l \leq \sigma_{екв.}, \quad (2)$$

де χ – константа матеріалу, що характеризує ступінь впливу у макроруйнуванні деформації зсуву, яка впливає на розрихлення (послаблення) матеріалу та утворення тріщин:

$$\chi = \sigma_p / \sigma_c, \quad (3)$$

де σ_p, σ_c – відповідно границі міцності при розтягу та стиску;

– для структурно-неоднорідного матеріалу

$$\chi \cdot \sigma_i \cdot Q + (1 - \chi) \cdot \sigma_i \cdot P \leq \sigma_{екв}, \quad (4)$$

де Q, P – деякі функції впливу статистичних факторів на процеси деградації матеріалу, зокрема, на зародження тріщин (Q) та їхню еволюцію (P).

Встановлено, що структурна неоднорідність матеріалу під час виготовлення деталей машин визначається його хімічним складом, методом отримання та технологією формоутворення вхідної заготовки, наявністю макродефектів (включень, пор, раковин) після заготівельних операцій і технологічних методів оброблення.

Основний вплив статистичних факторів на міцність структурно-неоднорідного матеріалу відбувається в процесі еволюції тріщин під дією нормальних напружень, що визначає пріоритет функції P над функцією Q ($Q=1$). Функцію P визначають за формулою:

$$P = A_m^{1-I(\sigma)}, \quad (5)$$

де A_m – константа матеріалу, що залежить від характеру наявних дефектів і загального рівня структурної неоднорідності об'єму деталі; $I(\sigma)$ – функція напружень, що визначає «жорсткість» навантаження:

$$I(\sigma) = 3 \cdot \sigma_0 / \sigma_i = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i. \quad (6)$$

Константа матеріалу A_m відображає статистичну сутність процесу пошкодження та руйнування матеріалу:

$$A_m = ((1 - q)/q)^\beta, \quad (7)$$

де q – ймовірність порушення суцільності у будь-якому із n_i проблемних місць матеріалу:

$$q = \sum_{i=1}^n (n_i/n) \cdot q_i. \quad (8)$$

Константа матеріалу A_m визначається на підставі результатів випробувань матеріалу на міцність під час розтягу, стиску та кручення:

$$A_m = (\sigma_{екв} - \sqrt{3} \cdot \chi \cdot \tau_k) / ((1 - \chi) \cdot \tau_k), \quad (9)$$

де τ_k – границя міцності матеріалу при крученні.

Виходячи з умови еквівалентності ймовірностей крихкого руйнування згідно з теорією Вейбулла для згину та кручення, встановлено залежність для використання неруйнівних методів контролю стану матеріалу:

$$A_m = ((m + 2)/(4m + 4))^{1/m}, \quad (10)$$

де m – коефіцієнт гомогенності Вейбулла.

Встановлено, що один і той самий матеріал може бути як структурно-однорідним, так і структурно-неоднорідним, залежно від співвідношення між

розмірами наявних дефектів і розмірами об'єкта досліджень, технології формоутворення заготовки та деталі. Важливою характеристикою для визначення структурної неоднорідності матеріалу є коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m): $m < 10$ – для структурно-неоднорідних матеріалів; $m \geq 10$ – для структурно-однорідних матеріалів.

Обґрунтовано можливість реалізації трьох варіантів технологічного успадковування властивостей поверхневого шару при виготовленні машинобудівних виробів у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – вихідна деталь» за критерієм однорідності матеріалу.

Перший і другий варіанти під час виготовлення виробів методами механічного оброблення або оброблення тиском забезпечують необхідні для умов експлуатації параметри якості деталей машин під час їхнього технологічного успадковування без зміни початкового стану матеріалу заготовки: структурно-однорідного або структурно-неоднорідного.

Поряд із тим, дефекти заготовок на етапі заготівельного виробництва формують структурну неоднорідність матеріалу і поверхневого шару. Проектування раціональної структури технологічних маршрутів оброблення поверхонь виробів забезпечує зрізання дефектного шару після обробки та формування однорідної структури матеріалу готових деталей, що реалізує третій варіант технологічного успадковування параметрів якості.

Під час застосування методу ЛМ-твердості для аналізу процесу технологічного успадковування під час механічного оброблення виробів однорідність матеріалу визначається структурно-чутливим параметром – коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m), котрий корелює зі структурним станом матеріалу, та пов'язаними із ним константою матеріалу A_m , технологічною пошкоджуваністю D та інтенсивністю зростання технологічної пошкоджуваності j_D .

Гомогенність описується розподілом Вейбулла при побудові статистичних теорій міцності:

$$P(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{k}\right)^m}, \quad (11)$$

де коефіцієнт однорідності Вейбулла (m), у випадку використання методу ЛМ-твердості, визначається як:

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 \cdot S(\lg(H))}, \quad (12)$$

$$S(\lg(H)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg(H_i) - \overline{\lg(H)})^2}, \quad (13)$$

$$\overline{\lg(H)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg(H_i), \quad (14)$$

де $d(n)$ – параметр, що залежить від кількості вимірювань n твердості H .

Ступеню розсіювання досліджуваної фізико-механічної характеристики, зокрема, твердості, відповідають і інші статичні параметри, зокрема, коефіцієнт варіації, що показує, наскільки велике розсіювання величин, які містять розглядуваний обсяг даних, порівняно із середнім значенням твердості:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}}{\bar{H}}, \quad (15)$$

де \bar{H} – середнє значення твердості.

За реалізації методу LM-твердості під час технологічних оброблень зміну технологічної пошкоджуваності D та інтенсивності її зростання j_D визначено за розсіюванням характеристик твердості, використовуючи значення коефіцієнта Вейбулла (m):

$$D = (m_{matr.} - m_i) / m_{matr.}, \quad (16)$$

$$j_D = (m_{matr.} - m_i) / m_i, \quad (17)$$

де $m_{matr.}$, m_i – відповідно розсіювання твердості основного матеріалу та в i -му перерізі виробу, що визначають за формулами (12)–(14).

За невідомого розподілу коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) по товщині (глибині) деталі технологічне успадковування параметрів виробу оцінюється за поточними значеннями (m) у досліджуваних перерізах і константою матеріалу A_m , розрахованою за формулою (10). Якщо розподіл коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) по товщині (глибині) виробу є відомим, то технологічне успадковування його параметрів оцінюється за поточними значеннями (m) у досліджуваних перерізах, технологічною пошкоджуваністю D , визначеною за формулою (16), і інтенсивністю її зростання j_D , обчисленою за формулою (17).

Запропоновано поряд із множиною регламентованих параметрів якості виробу (точністю оброблення, геометричними і фізико-механічними параметрами якості поверхневого шару тощо) під час аналізу технологічного успадковування враховувати динаміку зміни показників гомогенності (однорідності) матеріалу:

$$\left| \begin{array}{l} m_{x_0} < m_{x_1} < \dots < m_{x_k} < \dots < m_{x_n} \rightarrow \infty; \quad v_{x_0} > v_{x_1} > \dots > v_{x_k} > \dots > v_{x_n} \rightarrow 0 \\ A_{x_0} < A_{x_1} < \dots < A_{x_k} < \dots < A_{x_n} \rightarrow I; \quad D_{x_0} > D_{x_1} > \dots > D_{x_k} > \dots > D_{x_n} \rightarrow 0; \end{array} \right|, \quad (18)$$

де m_{x_0}, \dots, m_{x_n} ; v_{x_0}, \dots, v_{x_n} ; A_{x_0}, \dots, A_{x_n} ; D_{x_0}, \dots, D_{x_n} – відповідно зміна коефіцієнта гомогенності Вейбулла, коефіцієнта варіації, константи матеріалу, технологічної пошкоджуваності матеріалу виробу та інтенсивності її зростання за реалізації раціонального маршруту оброблення x -ої поверхні; $k=0$ – вхідна заготовка; $k=1, \dots, n$ – методи обробки x -ої поверхні.

Встановлено, що деградовні відмови (ДСТУ 2860-94) супроводжуються порушенням однорідності поверхневого шару матеріалу виробів та його технологічною пошкоджуваністю. Технологічна пошкоджуваність матеріалу характеризує процес зародження та розвиток технологічних дефектів під час формоутворення заготовок, виготовлення деталей машин, що трансформуються у пошкодженість виробів під час їхньої експлуатації.

Встановлено, що в самоорганізованих системах керування їхньою адаптивністю та надійністю здійснюється умовами формування та величинами флуктуацій за рахунок зміни кількості підсистем, їхніх параметрів або критеріїв. Технологічне забезпечення регламентованих показників якості виробів відповідно до необхідних експлуатаційних характеристик і показників надійності

Під час дослідження обмеженої кількості доміантних систем (та їхніх складових) на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва запропоновано проектування раціональної структури технологічного маршруту оброблення виконавчих поверхонь виробу здійснювати не за традиційними для технології машинобудування критеріями точності та якості поверхневого шару, а за параметром однорідності (гомогенності) матеріалу. При цьому розрахункове уточнення ε_p обчислюють за встановленими значеннями розсіювання характеристик твердості матеріалу:

$$\varepsilon_p = m_{дет.} / m_{заг.}, \quad (19)$$

де $m_{дет.}$, $m_{заг.}$ – відповідно коефіцієнти гомогенності Вейбулла для деталі та заготовки.

Уточнення для i -го технологічного переходу під час технологічного успадковування визначають за відомими значеннями розсіювання характеристик твердості матеріалу:

$$\varepsilon_i = m_i / m_{i-1}, \quad (20)$$

де m_i , m_{i-1} – відповідно коефіцієнти гомогенності Вейбулла на поточному та попередньому технологічних переходах.

Для перевірки правильності вибору n технологічних обробок використовують нерівність:

$$\prod_{i=1}^n \varepsilon_i \geq \varepsilon_p. \quad (21)$$

Встановлено, що для умов експлуатації відповідальних машин необхідно забезпечити регламентовані показники їхньої надійності, які визначаються показниками надійності деталей та розраховуються з використанням теорії розмірних ланцюгів.

Критерій однорідності матеріалу (КОМ) для аналізу технологічного успадковування параметрів якості деталей під час їхнього виготовлення методами різання, пластичного деформування та контролі властивостей поверхневого шару методом LM-твердості представлено у вигляді:

- для визначеного технологічного переходу під час аналізу процесу технологічного успадковування властивостей

$$\begin{aligned} КОМ \in [m = f(H_1, H_2, \dots); v = f(H_1, H_2, \dots); \\ A = f(m); D = f(m); j_D = f(m); \varepsilon_i = m_i / m_{i-1}] \end{aligned}, \quad (22)$$

- для технологічного успадковування параметрів якості виробу від заготовки до деталі

$$\left| \begin{array}{l} m_{x_0} < m_{x_1} < \dots < m_{x_k} < \dots < m_{x_n} \rightarrow \infty; \quad v_{x_0} > v_{x_1} > \dots > v_{x_k} > \dots > v_{x_n} \rightarrow 0 \\ A_{x_0} < A_{x_1} < \dots < A_{x_k} < \dots < A_{x_n} \rightarrow 1; \quad D_{x_0} > D_{x_1} > \dots > D_{x_k} > \dots > D_{x_n} \rightarrow 0; \\ \varepsilon_{x_1} > \dots > \varepsilon_{x_k} > \dots > \varepsilon_{x_n} \rightarrow 0 \quad \text{за } T_0 = \sum_{k=1}^n t_{ok} \end{array} \right|, \quad (23)$$

- для структурно-неоднорідного стану матеріалу поверхневого шару виробу

$$m < 10; v \rightarrow 1(100\%); A_m < 0,878; D \rightarrow 1, \quad (24)$$

– для структурно-однорідного стану матеріалу поверхневого шару виробу

$$m \geq 10; \nu \rightarrow 0; A_m \geq 0,878; D \rightarrow 0, \quad (25)$$

де t_{ok} – основний (машинний) час при виконанні k -го технологічного переходу (метода оброблення); T_0 – сумарний основний (машинний) час на оброблення визначеної поверхні виробу.

Значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у виразах (22)–(25) визначають за формулами (12)–(14), коефіцієнта варіації – за формулою (15), константи матеріалу A_m – за формулою (10), технологічної пошкоджуваності D та інтенсивності її зростання j_D – за формулами (16) і (17) відповідно, уточнення по переходах за відомими значеннями розсіювання характеристик твердості матеріалу – за формулами (19)–(21).

Кількість використовуваних показників (22)–(25) для оцінки однорідності матеріалу заготовки на визначеному технологічному переході визначається складністю виконуваних технологічних завдань для різних етапів проектування.

Критерієм оцінки забезпечення регламентованого параметра виробу за принципом ООП ТП є величина допуску для розмірів, параметрів якості поверхневих шарів, відхилень форми та їхнього взаємного розташування, що визначається значеннями граничних відхилень. Досягнення нижньої чи верхньої границі допуску регламентованим параметром виконавчої чи базової поверхні виробу під час виготовлення чи експлуатації спричинює його перехід у граничний стан за заданим показником. Для принципу ФОП ТП необхідно додатково забезпечити визначені за допомогою теорії розмірних ланцюгів граничні значення показників безвідмовності та довговічності елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» (ВПД(3)).

Під час виготовлення виробу граничний стан для елементів системи ВПД(3) має різне інтерпретування. Для заготовки виробу, під час оброблення на визначеній технологічній операції, граничний стан визначається фактичним значенням хоча б одного з її параметрів біля нижньої або верхньої границі допуску згідно з технічними вимогами конструкторсько-технологічної документації. Для металорізального верстату, верстатного пристрою та металорізального інструменту граничний стан визначається зміною геометричних розмірів, фізико-механічних властивостей вихідних параметрів у процесі експлуатації внаслідок зношування, втоми, корозії тощо.

Розроблено узагальнену принципову схему (рис. 3) дослідження впливу елементів технологічної системи ВПД(3) на формування регламентованих параметрів якості заготовки виробу із застосуванням PSPAS-системи у взаємозв'язках із САФ-системою (варіант (А), рис. 3), як незалежного елемента інтегрованої конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (варіант (Б), рис. 3), як основного елемента конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (варіант (В), рис. 3).

Під час виготовлення виробу (рис. 3) загальна ймовірність $P(t)$ – ймовірність забезпечення регламентованих параметрів об'єкту машинобудівного виробництва, що визначається числовими значеннями технологічних параметрів у межах границь

допуску протягом усього технологічного процесу виготовлення виробу – формується на основі особливостей трьох груп його вихідних параметрів:

1. Незначна частина вихідних параметрів проміжних операцій (зокрема характеристики матеріалу) переходить у розряд кінцевих (параметри I групи, рис. 3).

2. Фінішні та викінчувальні технологічні операції забезпечують формування регламентованих технічними вимогами параметрів точності оброблення та якості поверхні (параметри II групи, рис. 3).

3. Відповідно до технологічного успадковування властивостей частина вихідних параметрів (III група, рис. 3) функціонально пов'язана з параметрами попередніх проміжних операцій.

4. Характеристики матеріалу, заготовки у випадку неякісного вхідного контролю або за його відсутності впливають на формування кінцевих параметрів виробу.

5. Контрольні операції (K, рис. 3) слугують для своєчасного виявлення та недопущення браку на різних стадіях ТП.

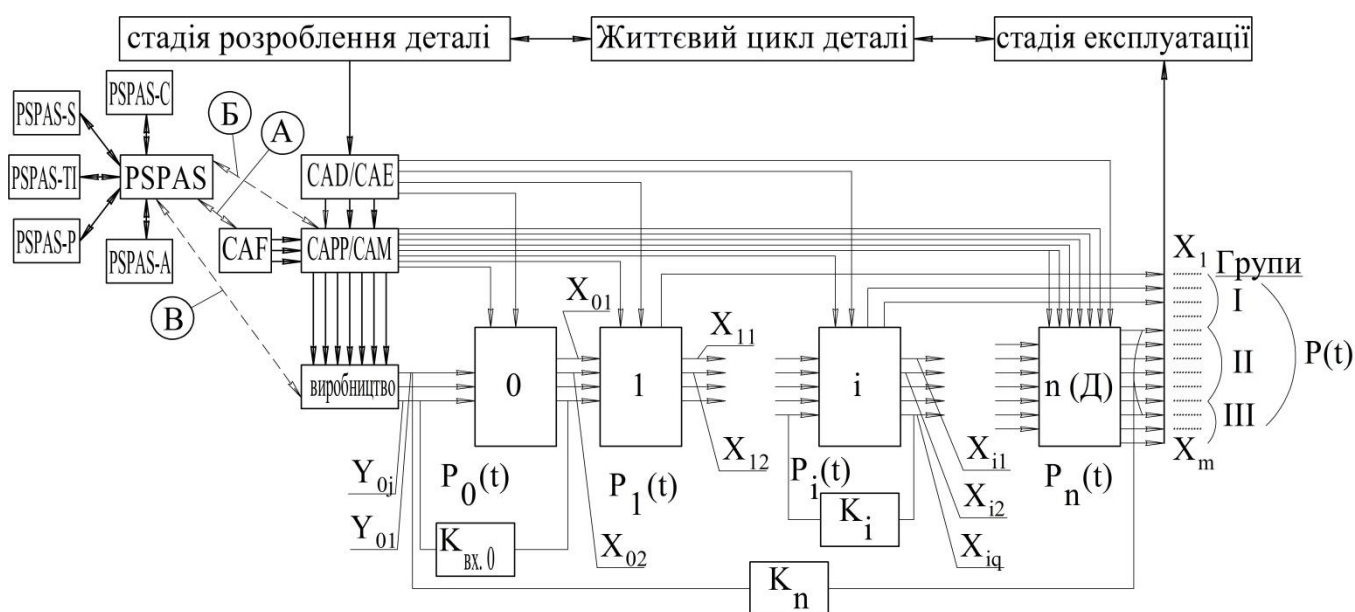


Рис. 3. Принципова схема дослідження впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на формування регламентованих параметрів якості заготовки деталі на стадії її розроблення у життєвому циклі для принципу ФОП ТП

Ймовірність недосягнення граничного стану заготовки деталі $P_{X_{ij}}(r, k, \dots, t)$ за j -м параметром на i -й технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу із врахуванням теореми додавання несумісних подій визначається за формулою:

$$P_{X_{ij}}(r, k, \dots, t) = \prod_{j=1}^{q_i} (1 - F_{X_{ij}}(r, g, \dots, t)), \quad (25)$$

де X_{ij} ($j \in [1; q_i]$) – визначений j -й вихідний параметр X для i -ї технологічної операції; $F_{X_{ij}}(r, k, \dots, t)$ – формування граничного стану заготовки у виробі за j -м параметром на i -й технологічній операції технологічного процесу під час його виготовлення.

Запропоновано математичний апарат опису марковських процесів для забезпечення регламентованих показників надійності деталей машин за дотримання параметрів якості заготовки деталі з урахуванням впливу елементів системи ВПД(З) на визначеній технологічній операції виготовлення виробу. Технологічний граф надійності для визначеної технологічної операції, що описується ланцюгами Маркова, наведений на рис. 4.

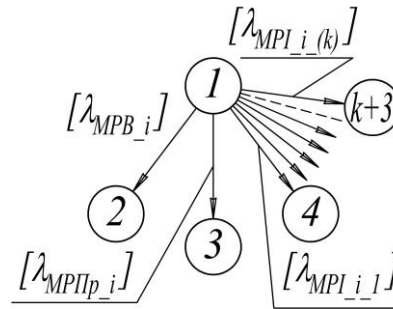


Рис. 4. Технологічний граф надійності для i -ї технологічної операції, що описується ланцюгами Маркова, для прогнозування ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі із врахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(З)

Вершини технологічного графа надійності на i -й технологічній операції (рис. 4) описують можливість перебування технічної системи у $(k+3)$ можливих станах із врахуванням впливу елементів технологічного середовища: 1 – елементи технологічної системи ВПД(З): металорізальний верстат (MPB), пристрій на металорізальному верстаті (MPr), металорізальний інструмент (MPI) під час оброблення заготовки виробу на i -й технологічній операції не перебувають у граничному стані, що забезпечує формування регламентованих параметрів якості виробу згідно з вимогами конструкторсько-технологічної документації; 2, 3, 4, ..., $(k+3)$ – відповідно металорізальний верстат, пристрій на металорізальному верстаті, перший/ k -ий металорізальний інструмент загалом або їхні елементи зокрема знаходяться у граничному стані у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на i -й технологічній операції. На рис. 4 позначено λ_{MPB_i} , λ_{MPr_i} , $\lambda_{MPI_{i_1}}$, ..., $\lambda_{MPI_{i(k)}}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстату, пристрою на металорізальному верстаті та першого/ k -того металорізального інструменту або їх елементів на i -й технологічній операції під час оброблення заготовки виробу.

Відповідно до рис. 4 введено позначення ймовірностей здійснення подій $P_1(t)$ – ймовірність перебування технічної системи у стані 1, що характеризує забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу під час її оброблення на i -й технологічній операції за умови недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом та їхніми елементами зокрема; $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, ..., $P_{(k+3)}(t)$ – ймовірність перебування технічної системи відповідно у станах 2, 3, 4, ..., $(k+3)$, що характеризує незабезпечення регламентованих параметрів заготовки

виробу при її обробленні на i -й технологічній операції за умови досягнення граничного стану відповідно металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті, першим/ k -м металорізальним інструментом загалом та (або) їхніми елементами зокрема.

Система диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена для технологічного графа надійності (рис. 4) з урахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(3) на забезпечення регламентованих параметрів якості машинобудівного виробу для i -ї технологічної операції має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_i} \cdot P_1(t) - \lambda_{МПP_i} \cdot P_1(t) - \sum_{k=1}^z \lambda_{MPI_i_k} \cdot P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_i} \cdot P_1(t); \quad \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_{МПP_i} \cdot P_1(t); \quad \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_{MPI_i_1} \cdot P_1(t); \\ &\dots\dots\dots; \quad \frac{dP_{(k)+3}(t)}{dt} = \lambda_{MPI_i_k} \cdot P_1(t); \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + \dots\dots\dots P_{(k)+3}(t) &= 1, \quad t \in [0; t] \end{aligned} \quad (26)$$

де k – k -й металорізальний інструмент на i -й технологічній операції ($i=1, \dots, z$).

Останнє рівняння у системі (26) представляє теорему додавання несумісних подій, що описує крайові умови. З точки зору опису фізичної суті прогнозування забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу під час її оброблення на i -й технологічній операції із врахуванням впливу елементів системи ВПД(3) дане рівняння представлено у вигляді:

$$P_{Д(3)i}(r, g, \dots, t) + F_{MPBi}(r, g, \dots, t) + F_{МПPi}(r, g, \dots, t) + \sum_{k=1}^z F_{MPI_i_k}(r, g, \dots, t) = 1, \quad (27)$$

де $P_{Д(3)i}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі на i -й технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу за умови недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті та металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом та їхніми елементами зокрема; $F_{MPBi}(r, g, \dots, t)$, $F_{МПPi}(r, g, \dots, t)$, $F_{MPI_i_k}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості на i -й технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу за умови досягнення граничного стану відповідно металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті, металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом або його (їхніми) елементами зокрема; k – k -й металорізальний інструмент на i -й технологічній операції.

Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі на i -й технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу за умови недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті та металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом та їхніми елементами зокрема визначається із формули (27):

$$P_{Д(3)i}(r, g, \dots, t) = 1 - F_{MPBi}(r, g, \dots, t) - F_{МПPi}(r, g, \dots, t) - \sum_{k=1}^z F_{MPI_i_k}(r, g, \dots, t), \quad (28)$$

При цьому умови забезпечення працездатності елементів системи ВПД(3) при виконанні технологічних завдань представлено нерівностями:

$$\begin{aligned} P_{Д(3)i}(r, g, \dots, t) \geq [P_{Д(3)}]; \quad (1 - F_{MPBi}(r, g, \dots, t)) \geq [P_{MPB}]; \\ (1 - F_{MPI_i}(r, g, \dots, t)) \geq [P_{MPI}]; \quad (1 - F_{MPI_{i_{(k)}}}(r, g, \dots, t)) \geq [P_{MPI}], \end{aligned} \quad (29)$$

де $[P_{Д(3)}]$, $[P_{MPB}]$, $[P_{MPI}]$, $[P_{MPI}]$ – відповідно регламентована ймовірність забезпечення визначеного показника надійності заготовки деталі, металорізального верстата, верстатного пристрою та металорізального інструменту.

У **третьому розділі** розроблено взаємозв'язки та встановлено закономірності у різновидах підсистем аналізу технологічного успадкування за характеристиками матеріалу виробу при проектуванні технологічних маршрутів та обробленні поверхонь заготовок деталей машин.

На підставі експериментальних досліджень проаналізовано стан матеріалу за показниками КОМ для заготовок вала 6Е4-2717.00.00.01 (матеріал – сталь 40Х ГОСТ 4543-71; заготовка – сортовий прокат; маса деталі – 243 кг; продукція ТзОВ «Транссистем», м. Львів) у перерізах під його виконавчі поверхні та кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса (матеріал – сталь 25Л ГОСТ 977-88; заготовка – литво у землю; маса деталі – 6,53 кг; продукція ТзОВ «ІнтерПЕТ», м. Львів) для поверхонь бобишок за розрахунками коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) за формулами (12–14), констант матеріалу A_m – за формулою (10) у середовищі Mathcad 15. Твердість виміряно переносним твердоміром ТД-42 фірми «Ультракон» за стандартною методикою методом Брінеля. Результати досліджень наведено у табл. 1, 2.

Таблиця 1

Зміна показників для аналізу однорідності матеріалу заготовки вала у перерізах під його виконавчі поверхні

Контроль однорідності структури матеріалу	Осьові перерізи вхідної заготовки під розташування шийок вала в розмір, мм					
	Ø 90h7	Ø 125h7	Ø 148h9	Ø 156h14	Ø 148h9	Ø 125h7
Коефіцієнт гомогенності (m)	6,123	6,132	9,665	11,457	11,142	6,101
Константа матеріалу A_m	0,815	0,815	0,874	0,892	0,889	0,814

Таблиця 2

Зміна показників для аналізу однорідності матеріалу заготовки кронштейна

Контроль однорідності структури матеріалу	Деталь 1		Деталь 2	
	Бобишка ліва	Бобишка права	Бобишка ліва	Бобишка права
Коефіцієнт гомогенності (m)	4,362	4,337	6,011	4,893
Константа матеріалу A_m	0,757	0,756	0,812	0,778

Для усіх осьових перерізів заготовки вала (табл. 1) під розташування його виконавчих, спряжених поверхонь і для бобишок кронштейна (табл. 2) на підставі результатів експериментальних досліджень отримано близькі до нуля значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) відповідно $m=6,123-11,457 \rightarrow 0$ і $m=4,337-6,011 \rightarrow 0$. Менші значення m для сталевих виливок зумовлені наявністю кірки із знеуглецьованого шару із низькою впорядкованістю та неоднорідністю структури. Для сортового прокату ця неоднорідність є меншою за рахунок попередньої механічної обробки заготовок.

Обчислено значення пов'язаних із коефіцієнтами гомогенності констант матеріалу для сталі 40Х ГОСТ 4543-71 $A_m=0,814-0,892$ і для сталі 25Л ГОСТ 977-88 $A_m=0,756-0,812$, які в обох випадках не перевищують 0,9.

Для призматичних виливків у кокіль із розмірами $145 \times 60 \times 15$ мм із алюмінієвого сплаву АК21М2,5Н2,5 ГОСТ 1853-93 вимірювання твердості здійснено на приладі ТР-5006 за шкалою Н за допомогою кульки $\varnothing 3,175$ з навантаженням 588,4 Н методом Роквелла за стандартною методикою. Встановлено, що значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла $m=17,373-32,776$ і констант матеріалу $A_m=0,926-0,959$ для алюмінієвих виливків у кокіль є вищими, ніж для сталевих заготовок.

Розроблено структуру технологічних маршрутів оброблення виконавчих і спряжених поверхонь заготовки вала 6Е4-2717.00.00.01 за аналізом показників КОМ.

Зміну показників точності й однорідності матеріалу після технологічних переходів у технологічних маршрутах оброблення поверхонь заготовки вала 6Е4-2717.00.00.01 приведено на рис. 5.

Встановлено, що в процесі механічного оброблення сталевого вала відбувається зменшення значень проміжних уточнень ε_i під час переходу від попередніх (чорнових) до фінішних (кінцевих) методів оброблення у технологічному ланцюжку «поверхня заготовки–поверхня деталі» як за критерієм точності зі зменшенням величин допусків розмірів, так і за критерієм однорідності матеріалу. Коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m), що характеризують підвищення однорідності структури матеріалу і зменшення схильності до його технологічної пошкоджуваності від заготовки до деталі, зростають (рис. 5, а).

Поряд із тим, у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – кінцева деталь» після кожного технологічного переходу відбувається ріст константи матеріалу A_m згідно технологічного успадковування. Під час механічного оброблення заготовки вала (рис. 5, б) для вибраного методу оброблення виконавчої поверхні значення A_m змінюється у вузьких межах, більше розсіювання має місце для заготовки та чорнових технологічних переходів із стабілізацією величин констант для фінішних обробок, що свідчить про вищу однорідність структури порівняно із чорновими методами оброблення поверхонь. Це підтверджує відомі закономірності вибору методів технологічного оброблення для принципу об'єктно-орієнтованого проектування: на кожному наступному переході оброблення елементарної поверхні звичайно підвищується на 1–3 квалітети на чорнових переходах, 1–2 квалітети – на напівчистових, 1 квалітет – на чистових і фінішних (рис. 5, б).

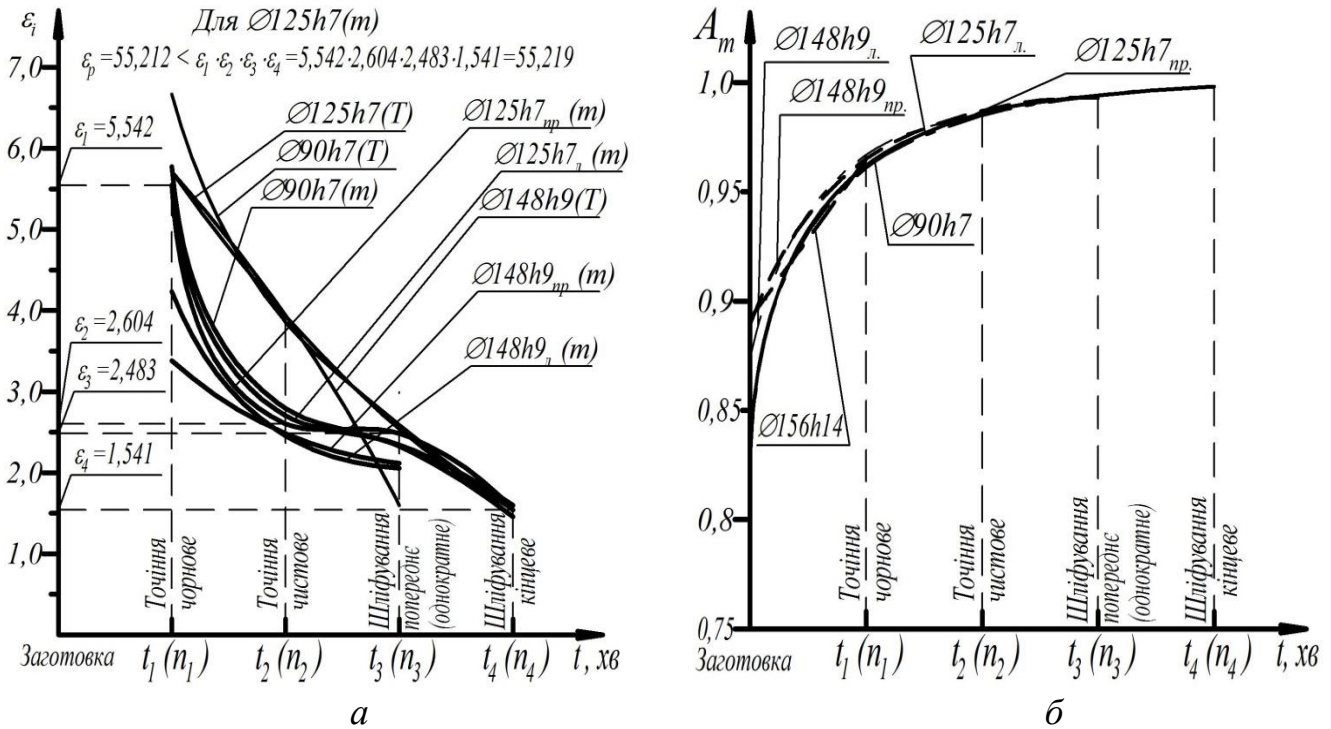


Рис. 5. Показники точності та однорідності матеріалу (а) і його констант (б) після технологічних переходів у маршрутах оброблення поверхонь сталевго вала згідно технологічного успадковування ($t_1(n_1)$, $t_2(n_2)$, ..., $t_n(n_n)$ – тривалість 1, 2, n -го технологічних переходів; (Т), (м) – зміна уточнень відповідно за точністю оброблення та однорідністю матеріалу; л., пр. – ліва, права шийки вала)

Оптимізовано структуру технологічних маршрутів оброблення алюмінієвих виливків у кокіль за показниками КОМ під час розрахунку технологічної пошкоджуваності D за формулою (16) за опрацюванням результатів експериментальних досліджень. Результати досліджень для двох альтернативних технологічних маршрутів механічного оброблення поверхонь виробу кінцевою фрезою: виливок – чорнове фрезерування – чистове фрезерування (1 варіант) і виливок – півчистове фрезерування – чистове фрезерування (2 варіант) приведено на рис. 6.

Встановлено, що для першого варіанту технологічного маршруту після чорнового фрезерування на ширину фрезерування 1 мм характерним є зменшення значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і збільшення значень технологічної пошкоджуваності D порівняно із аналогічними вимірюваннями для заготовки. Це пов'язано із окрихчуванням границь зерен і підвищенням структурної неоднорідності внаслідок значних силових навантажень під час чорнового механічного оброблення фрезеруванням. Чистове фрезерування виливка після чорнового на ширину фрезерування 0,3 мм сприяло зростанню коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) та зменшенню значень технологічної пошкоджуваності D , що обумовлено зняттям шару металу з розвиненою пошкодженістю після чорнового фрезерування (рис. 6, а).

Для другого варіанту технологічного маршруту після півчистового та чистового фрезерування на ширину фрезерування 0,3 мм (для кожного технологічного переходу) характерною є загальна тенденція до зростання коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і зменшення значень технологічної пошкоджуваності D порівняно із аналогічними вимірюваннями на поверхні заготовки. Динаміка зміни значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і технологічної пошкоджуваності D є інтенсивнішою для півчистового фрезерування, що пояснюється зняттям дефектного поверхневого шару заготовки із прилеглими до нього шарами окислень і бруду (рис. 6, б).

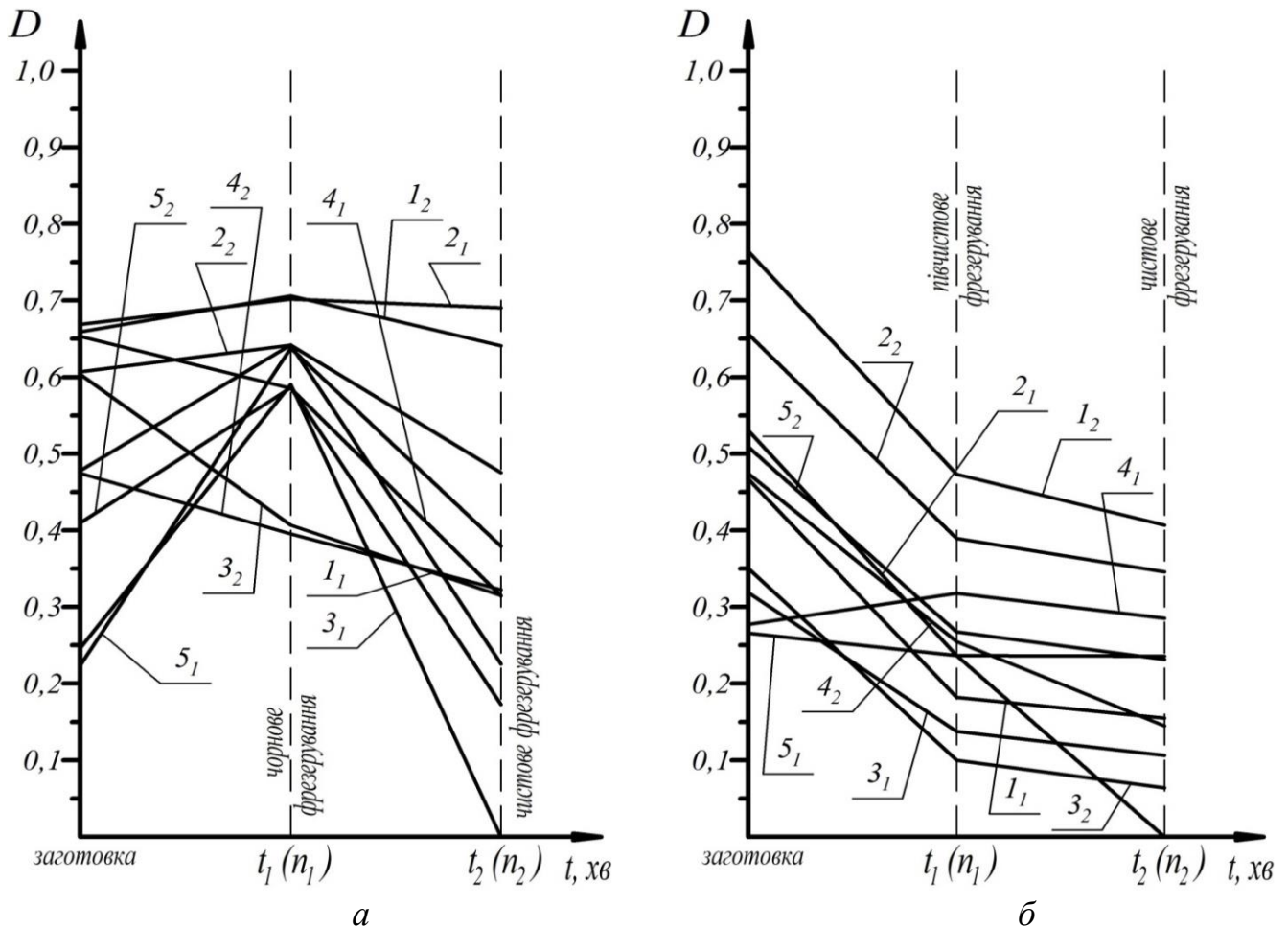


Рис. 6. Зміна технологічної пошкоджуваності (D) в поверхневому шарі вилівка у кокіль для першого (а) і другого (б) варіантів технологічного маршруту (1, 2 – заготовки, відлиті у холодні кокілі, 3, 4, 5 – заготовки, відлиті у підігріті кокілі; індекси 1, 2 вказують номер плавки металу; $t_1(n_1)$, $t_2(n_2)$, ..., $t_n(n_n)$ – основний (машинний) час для 1, 2, n -го технологічних переходів)

Для вилівка у піщано-глинисті форми з алюмінієвого сплаву АК розглянуто вплив конструктивних параметрів і цільового призначення інструменту на однорідність матеріалу під час оброблення на вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL. Чорнове фрезерування здійснено чотирма кінцевими фрезами фірми «Sandvik» $\varnothing 6$ мм, $\varnothing 8$ мм, $\varnothing 10$ мм, $\varnothing 12$ мм для напівчистового

фрезерування. Напівчистове фрезерування реалізовано аналогічними типорозмірами фрез для чорнового фрезерування.

На підставі експериментальних досліджень проаналізовано технологічне успадкування параметрів якості виливків з алюмінієвого сплаву АК за показниками КОМ після кожної фрезерної обробки. Результати досліджень показано на рис. 7.

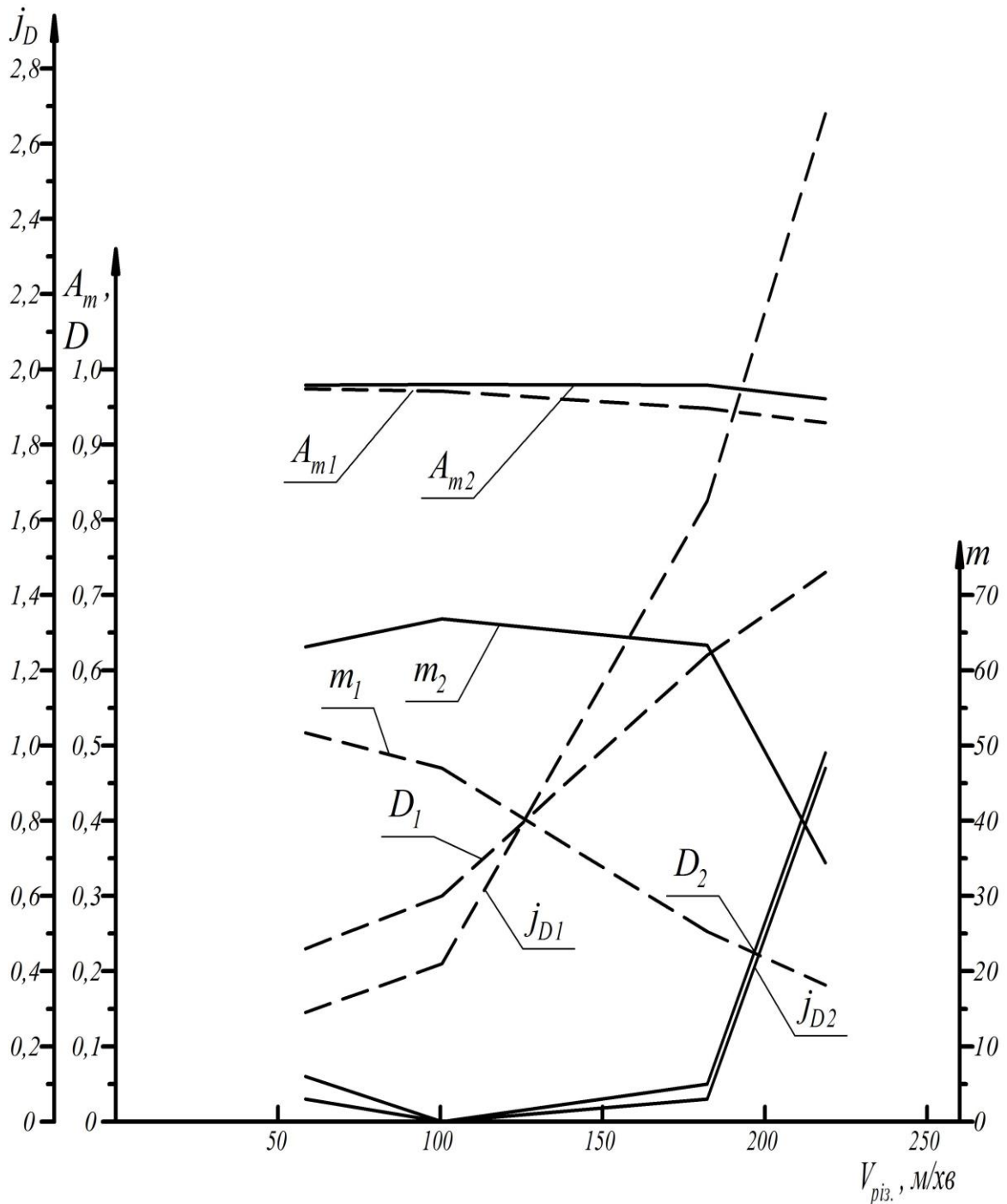


Рис. 7. Зміна показників для оцінки гомогенності матеріалу після фрезерування алюмінієвого виливка (індекси 1, 2 – чорнове та напівчистове оброблення відповідно)

Встановлено, що збільшення швидкості різання із $V_{\text{різ.}}=58,43$ м/хв до $V_{\text{різ.}}=218,65$ м/хв під час чорнового оброблення кінцевими фрезами для напівчистового фрезерування (рис. 7) супроводжується зменшенням коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) з 51,70 до 18,15, величини константи матеріалу A_m з 0,974 до 0,929, зростанням технологічної пошкоджуваності D у 3,17 разів та інтенсивності пошкоджуваності j_D у 9,24 рази. Після напівчистового оброблення чорновими кінцевими фрезами \varnothing 6–10 мм за тих самих значень $V_{\text{різ.}}$ коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) зростає у 1,22–2,51 рази, константа матеріалу стабілізується ($A_m=0,979-0,980$), а параметри D і j_D зменшуються практично до нуля, що обумовлено зменшенням кількості технологічних дефектів після попереднього чорнового оброблення. Водночас, напівчистове оброблення кінцевою фрезою \varnothing 12 супроводжується збільшенням параметра m у 1,9 рази, зменшенням технологічної пошкоджуваності D в 1,49 рази, інтенсивності пошкоджуваності j_D в 2,85 разів, збільшенням константи матеріалу A_m з 0,929 до 0,96 порівняно із чорновим обробленням.

У **четвертому розділі** розроблено взаємозв'язки та встановлено закономірності у підсистемі модифікування поверхні під час ППД (PSPAS-SPD/S/ТИ), що функціонує в результаті взаємозв'язків із підсистемою ППД як складовим елементом підсистем аналізу формоутворення виробу методом пластичного деформування (PSPAS-SPD), модифікування поверхневого шару виробу (PSPAS-S) і технологічного успадковування під час формоутворення виробу (PSPAS-ТИ) (рис. 2).

Встановлено математичні моделі зносостійкості під час виготовлення машинобудівних виробів. Отримано математичні залежності для апроксимації ділянок кривої Аббота під час фрезерування кінцевими фрезами фірми «Sandvik» для напівчистового і чорнового фрезерування \varnothing 6–12 мм на вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL.

Встановлено, що після чорнового фрезерування фрезами для напівчистої обробки формуються мікрорельєфи поверхонь характерних як для попереднього (фрезерування), так і для фінішного оброблення (шліфування). Однак після напівчистового фрезерування в основному формуються мікрорельєфи поверхонь, характерні для фінішної та викінчувальної обробок.

Тому застосування сучасних металорізальних інструментів і верстатів вимагає формування бази даних маршрутів оброблення поверхонь виробів для ефективного використання прогресивних елементів системи ВПД(3) під час оброблення машинобудівних виробів.

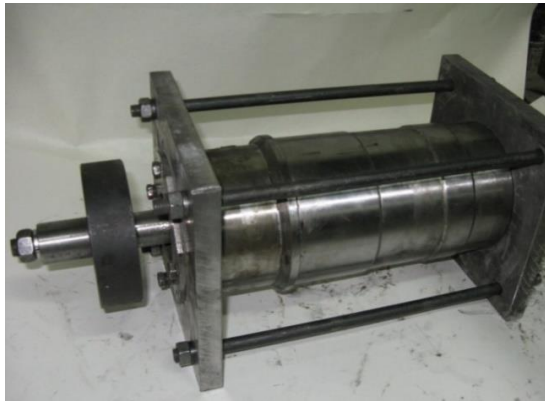
Розроблено технологічний процес виготовлення втулок циліндрових бурових pomp НБ-32 з використанням принципів ФОП ТП. Запропоновано у структурі заводського ТП замінити Внутрішньо-шліфувальну та Вертикально-хонігувальну операції для оброблення внутрішньої виконавчої поверхні $\varnothing 100H10$ ($Ra=0,8$ мкм) на Вібраційно-відцентрову та замінити матеріал вхідної заготовки – зі сталей 70, 40Х на сталь 20, сталь 45.

Адаптовано обладнання об'ємного вібраційного оброблення для реалізації методу вібраційно-відцентрового оброблення (ВВО_а) втулок циліндрових бурових

помп, розроблено принципову схему установки для застосування вібраційно-відцентрового зміцнення на вібротомашині об'ємного оброблення та спроектовано технологічне оснащення для його реалізації (рис. 8).

Технологічний маршрут оброблення ВВО_а поверхні Ø100Н10 складається із технологічних переходів: оброблення деформівними тілами – сталевими загартованими кульками Ø 10 мм і Ø 8,5 мм; очищення обробленої поверхні від бруду після попередніх обробок за допомогою ураліту; модифікування поверхні твердим сплавом ВК8 для підвищення її зносостійкості та збільшення ресурсу.

Встановлено, що за наявності «бар'єрів» для перенесення характеристик виробів у структурі ТП принцип технологічного успадковування їх властивостей в умовах самоорганізації технічних систем реалізується для технологічних переходів в межах наступної технологічної операції механічного оброблення або оброблення тиском.



а



б

Рис. 8. Технологічне оснащення для ВВО_а внутрішніх поверхонь циліндричних виробів на вібротомашині об'ємного оброблення

Результати експериментальних досліджень параметрів мікрорельєфу поверхні втулки наведено у табл. 3. Технологічне успадковування відносної опорної довжини профілю по середній лінії tm і висотних параметрів шорсткості поверхні показані на рис. 9.

Таблиця 3

Зміна параметрів мікрорельєфу поверхні у процесі оброблення ВВО

Послідовність віброоброблення	Параметри рельєфу поверхні, мкм				
	Ra	Rz	Rp	Rq	tm
вхідна поверхня після точіння	4,0093	12,7439	6,8248	4,3812	0,5220
оброблення кульками Ø 10 мм	0,5487	2,1325	1,8080	0,6528	0,5287
оброблення кульками Ø 8,5 мм	0,8774	4,1734	2,3736	1,2086	0,5870
очищення уралітом	1,0470	4,1642	2,7575	1,2350	0,5638
модифікування поверхні сплавом ВК8	0,6915	1,3829	1,2075	0,8350	0,7486

Встановлено, що внаслідок оброблення втулки ВВО_а після віброоброблення кульками $\varnothing 10$ мм істотно зменшуються висотні параметри її виконавчої поверхні (Ra , Rz , Rq , Rp) – у 3,78–7,29 разів, однак залишаються необроблені ділянки профілю, що спостерігається візуально і про що свідчить практично незмінне значення відносної опорної довжини профілю по середній лінії tm . Подальше почергове оброблення кульками $\varnothing 8,5$ мм та очищення поверхні уралітом призводять до погіршення висотних параметрів якості поверхневого шару, однак підвищується параметр tm (з 0,5287 до 0,5638–0,5870). Модифікування поверхні твердим сплавом ВК8 покращує як висотні параметри профілю виконавчої поверхні (табл. 3), так і значення tm (з 0,5222 (після чистового точіння) до 0,7486), що сприяє формуванню стійкого до зношування експлуатаційного рельєфу.

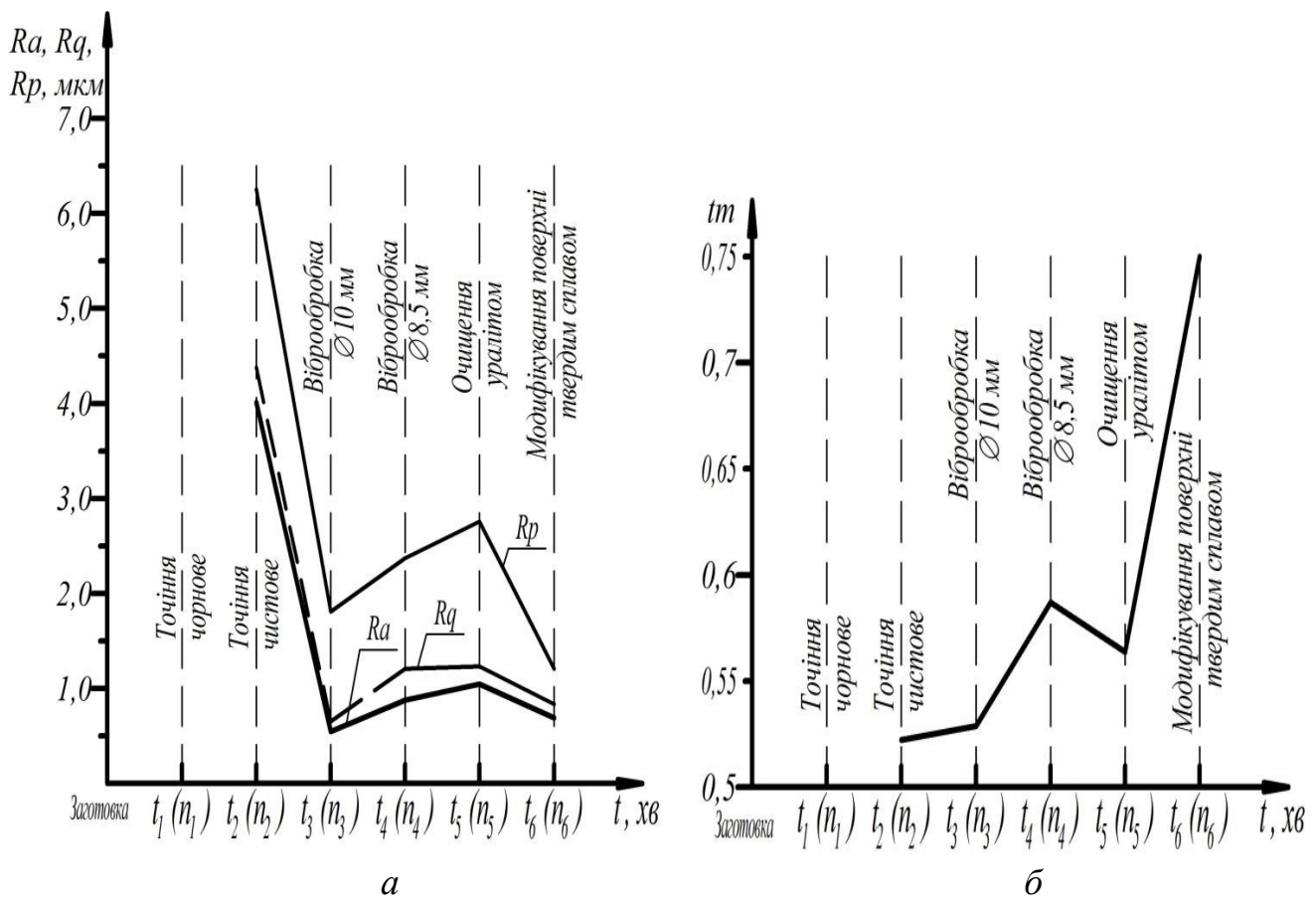


Рис. 9. Технологічне усадковування висотних параметрів шорсткості а) і відносної опорної довжини профілю по середній лінії tm б) виконавчої поверхні втулки циліндрової бурової помпи ($t_1(n_1)$, $t_2(n_2)$, ..., $t_6(n_6)$ – основний (машинний) час для 1, 2, ... 6-го технологічних переходів)

Застосування принципу функціонально-орієнтованого проектування при виготовленні втулок циліндрових pomp НБ-32 апробовано під час натурних випробувань, в результаті чого середнє напрацювання до відмови віброзміцнених втулок підвищилося у середньому на 65 %.

П'ятий розділ присвячено експериментальній апробації з технологічного забезпечення параметрів якості виробів як результату технологічного успадковування у технологічній системі ВПД(З) під час механічного оброблення.

Експерименти реалізовано з використанням математичного апарату ланцюгів Маркова та системи диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена. Визначено крайові умови та розраховано ймовірності забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу на кожній технологічній операції, зокрема під час виготовлення чавунного корпусу редуктора К 02.106, за умови недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним інструментом загалом та їхніми елементами зокрема.

На підставі результатів математичного моделювання визначено ймовірність забезпечення вихідних параметрів якості виробів для принципів ООП і ФОП ТП виготовлення корпусу редуктора К 02.106. Відмінності у розрахунках полягають у врахуванні для принципу ФОП ТП лише ймовірності забезпечення параметрів якості виконавчої поверхні для визначеної операції на противагу врахування усіх подій для даної технологічної операції для принципу ООП ТП. У зв'язку з цим ймовірність забезпечення параметрів якості після проміжної операції зокрема і після виконання ТП загалом є вищою для принципу ФОП ТП, ніж для принципу ООП ТП.

Розв'язано оптимізаційну задачу синтезу режимів оброблення, яка для проєктування технологічного процесу виготовлення виробів має вигляд:

$$t_{0k} \leq [t_0], \quad (30)$$

де t_{0k} – основний час на здійснення k -ого технологічного переходу ($k=1, \dots, n$); $[t_0]$ – граничне значення основного (машинного) часу за регламентованим показником надійності при визначеному законі його зміни для заданого виробу.

Результати розв'язання оптимізаційної задачі (30) для регламентованих значень гамма-відсоткового напрацювання до відмови (t_γ) при виготовленні корпусу редуктора К 02.106 на операції 005 Горизонтально-фрезерна приведено на рис. 10.

За результатами розв'язання оптимізаційної задачі (30) у середовищі Mathcad встановлено граничні значення основного часу для механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106 на операції 005 Горизонтально-фрезерна: за $P(t_\gamma)=0,99$ $[t_0]=3,99$ хв; за $P(t_\gamma)=0,95$ $[t_0]=20,38$ хв; за $P(t_\gamma)=0,9$ $[t_0]=41,87$ хв; за $P(t_\gamma)=0,8$ $[t_0]=88,67$ хв; за $P(t_\gamma)=0,5$ $[t_0]=275,43$ хв (рис. 10).

Встановлено критерії оптимізації для сталої величини робочого ходу інструмента ($L_{роб. ходу} = \text{const}$):

$$S_0 \geq [S_0]; n \geq [n]; S_{xв.} \geq [S_{xв.}]; T_{MPI} \leq [T_{MPI}], \quad (31)$$

де S_0 , n , $S_{xв.}$, $[S_0]$, $[n]$, $[S_{xв.}]$ – відповідно прийняті за паспортними даними металорізального верстата та граничні значення осьової подачі, частоти обертання шпінделя та хвилинної подачі для визначеного методу оброблення і забезпечення необхідної точності, якості поверхневого шару виробу та показників надійності; T_{MPI} , $[T_{MPI}]$ – відповідно фактичне та граничне значення стійкості металорізального інструменту.

Зокрема, під час оброблення корпусу К 02.106 для $L_{роб. ходу}=296$ мм і $[t_0]=3,99$ хв для операції 005 Горизонтально-фрезерна за $P(t_\gamma)=0,99$ граничне значення хвилинної подачі:

$$[S_{xв.}] = L_{роб.ходу} / [t_0], \quad (32)$$

$$[S_{xв.}] = 296 / 3,99 = 74,19 \text{ мм/хв},$$

що забезпечується ближчим більшим паспортним значенням $S_{xв.пасп.} = 80 \text{ мм/хв}$ і наступними (за зростанням) значеннями із ряду подач для горизонтально-фрезерного верстата мод. 6Р82.

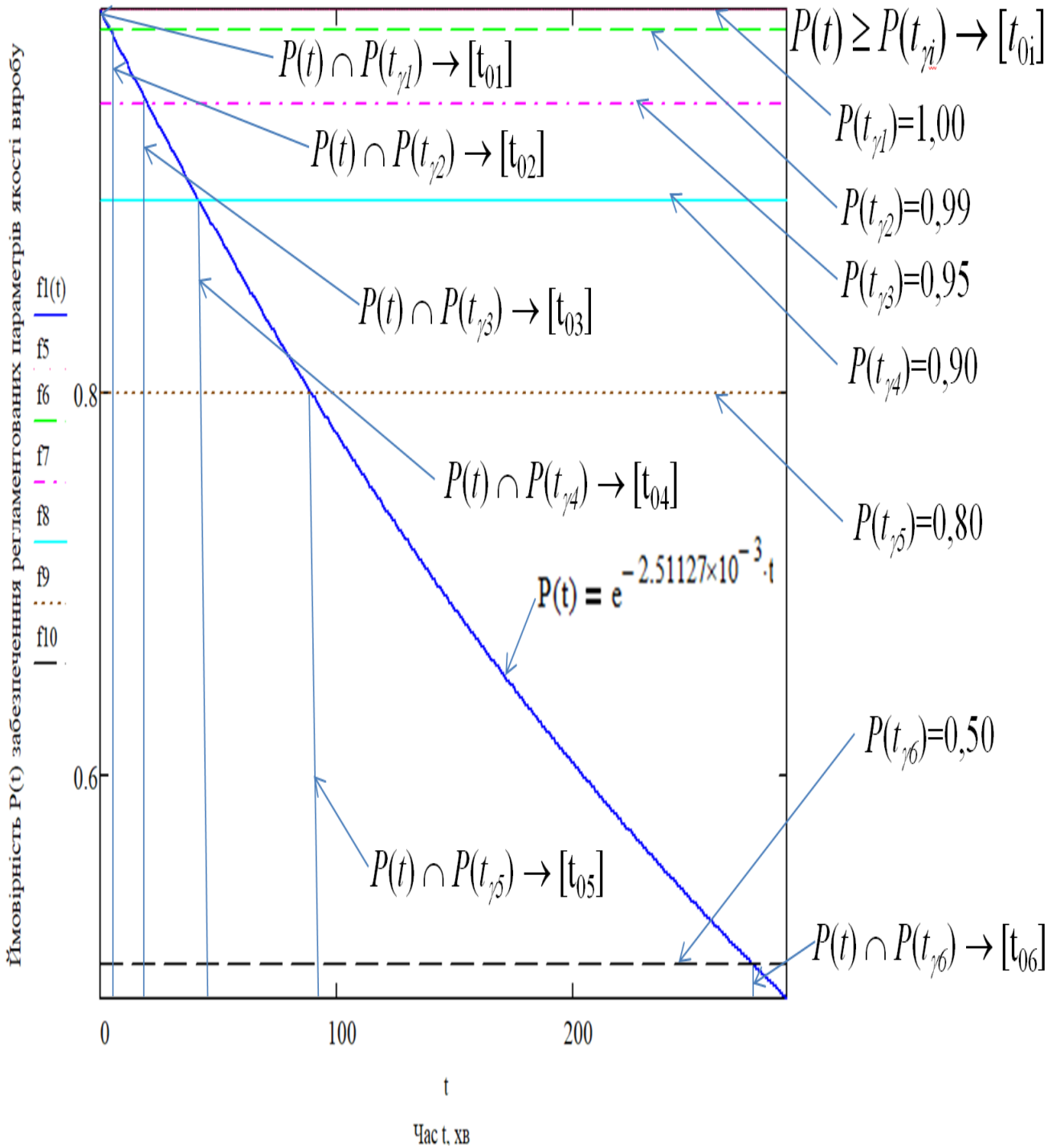


Рис. 10. Контроль отриманих і регламентованих значень гамма-відсоткового напрацювання до відмови (t_{γ}) корпусу редуктора К. 02.106 за його оброблення на операції 005 Горизонтально-фрезерна

На підставі розробленої методики аналізу впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на операціях механічного оброблення деталей машин (вали, важелі, корпуси, кронштейни, втулки) розраховано середнє ($\approx 0,9239$ або 92,39 %) та граничне ($\approx 0,7865$ або 78,62 %) значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів їхньої якості. Визначено середнє та граничне значення ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів якості за їх механічного оброблення за умови досягнення граничного стану елементами системи ВПД(З) ($\approx 0,08$ або 8 %) і ($\approx 0,235$ або 23,5 %).

Розраховане на підставі проведених досліджень граничне значення ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів якості деталей машин за їхнього механічного оброблення за умови досягнення граничного стану верстатом, пристроєм на верстаті та металорізальним інструментом становить 0,235 або 23,5 %, що забезпечує коефіцієнт запасу точності 1,235.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему в галузі технології машинобудування – розроблення узагальненого методологічного підходу для керування технологічним успадковуванням параметрів якості під час вибору структури технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів із врахуванням комплексу властивостей матеріалу, параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин, що забезпечують експлуатаційні характеристики та регламентовані показники надійності відповідно до службового призначення.

1. Аналіз сучасного стану технологічного забезпечення машинобудівних виробів в умовах інтегрованої системи автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва показав, що традиційна методологія аналізу технологічного успадковування, яка базується на врахуванні лише регламентованих параметрів точності і шорсткості поверхонь для технологічних переходів і операцій потребує структурного та методологічного вдосконалення.

2. Розроблено структуру та методичне забезпечення системи аналізу формоутворення об'єкта машинобудівного виробництва (PSPAS-система), що реалізовується на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва у складі автоматизованої системи аналізу формоутворення виробу (CAF-системи), або незалежно від CAF-системи для забезпечення принципу функціонально-орієнтованого проєктування під час виготовлення машинобудівних виробів. PSPAS-система враховує технологічне успадковування параметрів якості за критерієм однорідності матеріалу при проєктуванні раціональних технологічних маршрутів оброблення виконавчих поверхонь.

3. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності важконавантажених деталей машин реалізується в межах підсистеми аналізу технологічного успадковування під час формоутворення виробу (PSPAS-ТІ) системи аналізу формоутворення виробу (PSPAS-системи). Для системи PSPAS-ТІ необхідні експлуатаційні характеристики та показники надійності на різних етапах виготовлення деталей машин забезпечуються за критерієм однорідності матеріалу взаємозв'язками та закономірностями у підсистемах аналізу гомогенності

відповідно матеріалу вхідної заготовки (PSPAS-ТИМВ) і матеріалу під час формоутворення заготовки виробу (PSPAS-ТИМВ), що формують підсистему аналізу технологічного успадковування за характеристиками матеріалу виробу (PSPAS-ТИМ).

4. Обґрунтовано використання показників критерію однорідності матеріалу (КОМ) виробів: коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), константи матеріалу A_m і (або) технологічної пошкоджуваності D для аналізу технологічного успадковування параметрів під час проектуванні технологічних маршрутів оброблення поверхонь деталей машин. Оптимальні параметри точності, якості поверхневого шару, експлуатаційні характеристики та показники надійності деталей машин формуються під час оброблення заготовки деталі за технологічного успадковування від заготовки (0) до k -го технологічних переходів і операцій із дотриманням вимог: $m_{x_0} < m_{x_1} < \dots < m_{x_k} < \dots < m_{x_n} \rightarrow \infty$; $v_{x_0} > v_{x_1} > \dots > v_{x_k} > \dots > v_{x_n} \rightarrow 0$; $A_{x_0} < A_{x_1} < \dots < A_{x_k} < \dots < A_{x_n} \rightarrow 1$; $D_{x_0} > D_{x_1} > \dots > D_{x_k} > \dots > D_{x_n} \rightarrow 0$; $\varepsilon_{x_1} > \dots > \varepsilon_{x_k} > \dots > \varepsilon_{x_n} \rightarrow 0$.

5. Встановлено, що в умовах самоорганізації систем механічного оброблення для забезпечення регламентованих параметрів якості деталей машин проектування раціональної структури технологічного маршруту оброблення їхніх поверхонь реалізують за зміною показників однорідності матеріалу виробів для принципу функціонально-орієнтованого проектування. Поряд з тим вибір методів технологічних обробок для принципу об'єктно-орієнтованого проектування здійснюють за зміною показників точності та якості поверхневого шару. Для принципу функціонально-орієнтованого проектування уточнення параметрів від заготовки до деталі на визначеному технологічному переході забезпечується співвідношенням коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) на цьому та попередньому переходах. Збільшення значень (m) від заготовки до деталі під час оброблення її поверхні характеризується зменшенням неоднорідності матеріалу та його меншою схильністю до пошкоджуваності у процесі експлуатації.

6. Підсистема аналізу технологічного успадковування за характеристиками матеріалу виробу (PSPAS-ТИМ) складається із підсистем аналізу гомогенності матеріалу вхідної заготовки (PSPAS-ТИМВ) і аналізу гомогенності матеріалу під час формоутворення заготовки виробу (PSPAS-ТИМВ). Під час розроблення взаємозв'язків і встановлення закономірностей у даних підсистемах показано, що параметри деталі формуються внаслідок технологічного успадковування властивостей матеріалу заготовки в результаті технологічних оброблень. Наприклад, експериментально встановлено, що при обробленні масивних валів із сортового прокату із сталі 40Х ГОСТ 4543-71 і виливків кронштейнів підтримки штанги тролейбуса із сталі 25Л ГОСТ 977-88 їхні заготовки характеризуються низькою впорядкованістю структури поверхневих шарів. Це підтверджується низькими значеннями коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) відповідно $m=6,123-11,457 \rightarrow 0$ і $m=4,337-6,011 \rightarrow 0$, що відповідає стану структурно-неоднорідного матеріалу за середніми значеннями m . Розраховані константи матеріалу, які пов'язані із коефіцієнтами гомогенності Вейбулла (m), для сталі 40Х ГОСТ 4543-71 $A_m=0,814-0,892$ і для сталі 25Л ГОСТ 977-88 $A_m=0,756-0,812$ не перевищують значення 0,9. На відміну від сталевих заготовок для виливків у кокіль із алюмінієвого сплаву АК21М2,5Н2,5

ГОСТ 1853-93 значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла $m=17,373-32,776$ і константи матеріалу $A_m=0,926-0,959$ є вищими. Це відповідає стану структурно-однорідного матеріалу та характеризується вищою впорядкованістю структури поверхневих шарів алюмінієвих заготовок порівняно зі сталевими.

7. Технологічне успадкування властивостей матеріалу під час механічного оброблення сталевих виробів забезпечує перетворення структурно-неоднорідного матеріалу заготовок у структурно-однорідний матеріал деталей, що підтверджується збільшенням значень коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) і констант матеріалу A_m . Водночас, технологічні обробки для алюмінієвих заготовок не змінюють початкового структурно-однорідного стану матеріалу при забезпеченні збільшення значень коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) і зменшення значень технологічної пошкоджуваності D . Під час механічного оброблення сталевих заготовок виробів методами лезової та абразивної обробки змінюються константи матеріалу у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – вихідна деталь» $A_m=0,814-0,966$. Тут вище розсіювання значень констант має місце для заготовки та чорнових технологічних переходів із стабілізацією величин констант для методів фінішного оброблення. Це свідчить про вищу однорідність структури після фінішного оброблення порівняно із чорновими методами оброблення поверхонь та підтверджує відомі закономірності для принципу об'єктно-орієнтованого проектування: на кожному наступному переході оброблення елементарної поверхні підвищується на 1–3 квалітети на чорнових переходах, 1–2 квалітети – на напівчистових, 1 квалітет – на чистових і фінішних. Чистові методи лезового оброблення у технологічних маршрутах оброблення поверхонь алюмінієвих заготовок характеризуються зростанням до 49,41–60,21 % коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m), що забезпечує підвищення однорідності структури матеріалу та його меншу схильність до пошкодженості у процесі експлуатації.

8. Застосування комбінованих методів технологічного оброблення для принципу функціонально-орієнтованого проектування забезпечується використанням двох і більше одночасних варіантів простих методів технологічного впливу елементів в умовах самоорганізації технологічної системи ВПД(З). Адаптований під вібрмашини об'ємної обробки метод вібраційно-відцентрового оброблення, який розроблений у Національному університеті «Львівська політехніка», забезпечує регламентовані параметри якості, необхідні експлуатаційні характеристики та показники надійності за рахунок сумісного впливу коливань і взаємодії із оброблюваною поверхнею твердосплавного середовища. Запропонована технологія реалізується взаємозв'язками та визначається закономірностями підсистеми модифікування поверхні під час поверхневого пластичного деформування (PSPAS-SPD/S/TI) внаслідок взаємовпливу підсистем аналізу поверхневого пластичного деформування (PSPAS-SPD), модифікування поверхневого шару виробу (PSPAS-S) і технологічного успадкування при формоутворенні виробу (PSPAS-TI).

9. Встановлено, що за наявності технологічних «бар'єрів» у структурі технологічного процесу принцип технологічного успадкування властивостей виробів реалізовується для технологічних переходів в межах наступної

технологічної операції механічного оброблення або обробки тиском. Заміна у технологічних процесах методів абразивного оброблення на вібраційно-відцентрове зміцнення під час виготовлення втулок циліндрових бурових pomp сприяє покращення параметрів мікрорельєфу виконавчої внутрішньої циліндричної поверхні. В результаті віброоброблення циліндрової втулки кульками $\varnothing 10$ мм істотно зменшуються висотні параметри її виконавчої поверхні (Ra , Rz , Rq , Rp) – у 3,78–7,29 разів, проте залишаються необробленими ділянки профілю. Про це свідчить практично незмінне значення відносної опорної довжини профілю по середній лінії профіля tm . Подальше почергове оброблення кульками $\varnothing 8,5$ мм та очищення поверхні уралітом погіршує висотні параметри якості поверхневого шару, однак підвищує параметр tm (з 0,5287 до 0,5638–0,5870). Модифікування поверхні твердим сплавом ВК8 покращує як висотні параметри профілю виконавчої поверхні, так і значення tm (з 0,5222 (після чистового точіння) до 0,7486). Модифікування поверхні сприяє формуванню стійкого до зношування експлуатаційного рельєфу. Ефективність реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування під час виготовлення втулок циліндрових бурових pomp НБ-32 апробовано на етапі натурних випробувань. Середнє напрацювання до відмови віброзміцнених втулок підвищується у середньому на 65 % із заміною матеріалу вхідної заготовки зі сталей 70, 40Х на сталь 20, сталь 45.

10. Під час дослідження процесу забезпечення регламентованих параметрів якості виробу під час його виготовлення з урахуванням впливу технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» використано математичний апарат ланцюгів Маркова. Розроблено технологічні графи надійності для експоненціального закону розподілу випадкових величин із побудовою систем диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена для усіх операцій технологічного процесу. Встановлено, що в процесі експериментальної апробації запропонованої методики під час виготовлення корпуса редуктора К.02.106 середнє значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості за умови недосягнення граничного стану металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті та металорізальним інструментом становить 92,39 % за граничного – 78,62 %. При цьому ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості корпуса редуктора за умови досягнення граничного стану металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті та металорізальним інструментом становить 7,61 % за граничного – 21,38 %.

11. На підставі реалізації розробленої методики впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на забезпечення регламентованих параметрів якості на операціях механічного оброблення різноманітних деталей (вали, важелі, корпуси, кронштейни, втулки) середнє значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості виробів за умови недосягнення граничного стану металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті та металорізальним інструментом становить 83 % за граничного – 76,5 %. При цьому граничне значення ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів якості оброблених деталей машин за умови досягнення граничного стану верстатом, пристроєм на верстаті та

металорізальним інструментом дорівнює 23,5 % або 0,235, що забезпечує коефіцієнт запасу точності 1,235.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Кусий Я. М. Дослідження впливу викінчувальних операцій на формування параметрів якості поверхні втулок бурових pomp. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – 2020. № 2. – С. 14–22.

2. Кусий Я. М. Оптимізація маршруту оброблення поверхонь заготовки за критерієм однорідності структури матеріалу. *Системні технології.* – 2021. Том 1, № 132. – С. 76–91.

3. Кусий Я. М., Кук А. М. Технологічне успадкування властивостей виробу на стадії створення його життєвого циклу. *Системні технології.* – 2021. Том 4, № 135. – С. 119–134 (*проаналізовано формування технологічного успадкування властивостей виробу на стадії його створення у життєвому циклі*).

4. Кусий Я. М., Личак О. В. Вплив елементів конструкції вилівка на еволюцію технологічних дефектів. *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті.* – 2021. № 24. – С. 46–56 (*розроблено методику визначення впливу концентраторів напружень виливків за критерієм технологічної пошкоджуваності*).

5. Кусий Я. М., Личак О. В., Онисько, О. Р. Розроблення структурної моделі життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадкування. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.* – 2020. № 1. – С. 23–37 (*розроблено структурну модель життєвого циклу виробу із врахуванням принципів технологічного успадкування його властивостей*).

6. Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Визначення раціонального припуску на оброблення поверхонь заготовки за критерієм технологічної пошкоджуваності. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – 2021. № 1 (7). – С. 24–33. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.04 (*розроблено методику визначення раціонального припуску за розсіюванням параметрів механічних характеристик матеріалу виробів*).

7. Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Дослідження впливу режимів вібраційно-відцентрового зміцнення на геометричні параметри якості поверхні довгомірних циліндричних деталей. *Міжгалузевий збірник наукових праць "Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні".* – 2009. № 43. – С. 44–51 (*проаналізовано вплив технологічних параметрів вібраційно-відцентрового оброблення на формування геометричних параметрів якості виробів*).

8. Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Моделювання вібраційно-відцентрового зміцнення виробів. *Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні".* – 2012. № 746. – С. 172–175 (*розроблено метод вібраційно-відцентрового оброблення виробів*).

9. Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Модернізований комплекс для контролю параметрів мікрорельєфу поверхонь деталей машин. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”*. – 2008. № 614. – С. 100–107 (*модернізовано комплекс для контролю параметрів мікрорельєфу поверхонь деталей машин*).

10. Кусий Я. М., Топільницький В. Г., Василів Х. Б. Дослідження мікрорельєфу віброзміцнених втулок бурових pomp. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”*. – 2011. № 713. – С. 171–175 (*проаналізовано формування геометричних параметрів якості виконавчих поверхонь виробів після вібраційно-відцентрового оброблення*).

11. Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Дослідження якості поверхні віброзміцнених деталей машин. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”*. – 2013. № 772. – С. 196–201 (*проаналізовано формування геометричних параметрів якості виконавчих поверхонь виробів після вібраційно-відцентрового оброблення*).

Статті у наукових періодичних фахових виданнях України, що включені до наукометричних баз даних

12. Kusy J. M., Topilnytskyj V. G.: Influence of structural components placement on casting technological damages formation. *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.– 2019. № 5 (1330). – С. 41-45 (*Index Copernicus*) (*досліджено вплив концентраторів напружень у виливках на формування технологічних пошкоджень*).

13. Kusy J., Kuk A., Topilnytskyu V. Vibratory-centrifugal strengthening’s influence on failure-free parameters of drilling pumps bushings. *Technology audit and production reserves*. – 2018. Vol. 1 No 1 (39). – С. 4-12 (*Index Copernicus*) (*проаналізовано вплив параметрів вібраційно-відцентрового оброблення на показники надійності втулок бурових pomp*).

14. Kuzin O., Kusy J., Kuzin N. Analysis of technological damageability of castings manufactured in sand molds. *Technology audit and production reserves*. – 2017. Vol. 3 No 1. – P. 17-23 (*Index Copernicus*) (*розроблено методику визначення технологічної пошкоджуваності виливків*).

15. Кузін О.А., Кусий Я.М., Топільницький В.Г. Вплив технологічної спадковості на параметри надійності виробів. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. – 2015. Том 1 № 1 (21). – С. 15-21 (*Index Copernicus*) (*проаналізовано вплив технологічної спадковості на формування параметрів надійності деталей машин*).

16. Кусий Я.М. Технологічне успадковування властивостей при забезпеченні параметрів якості виробу в процесі його виготовлення. *Системні технології*. – 2019. № 5 (124). – С. 171-184 (*Index Copernicus*).

17. Кусий Я.М., Кузін О.А., Кузін М.О. Вплив технологічного маршруту оброблення на формування міжзеренної пошкоджуваності виливків. *Східно-європейський журнал передових технологій*. – 2016. Vol. 1 No 5. (79). – С. 39-47

(Scopus) (досліджено вплив технологічного маршруту оброблення алюмінієвих виливків на формування їх міжзеренної пошкоджуваності).

18. Кусий Я.М., Кук А.М. Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення для технологічного забезпечення безвідмовності деталей машин. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. Vol. 1 № 7 (73). – С. 41-51 (Scopus) (адаптовано обладнання об'ємного вібраційного оброблення для реалізації методу вібраційно-відцентрового зміцнення деталей машин форми тіл обертання).

Розділ у колективній монографії

19. Ya. Kusiі, O. Lychak, A. Kuk, O. Kostiuк, Іu. Novitskyi Development a Blank Production Technology in a Structural Model of a Life Cycle of a Part taking into account Mechanics of Technological Inheritability. Monograph “Scientific foundations of modern engineering”, part “MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICAL ENGINEERING”. – Boston: Primedia e Launch, 2020, P. 240–252. Available at : DOI : 10.46299/isg.2020.MONO.TECH.I p (розроблено технологію заготівельного виробництва у структурній моделі життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадковування).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав, які включені до міжнародних наукометричних баз даних

20. . Kusiі, J., Kuk A. Analysis of the rational route of aluminium alloy castings mechanical treatment on the basis of the reliability criterion. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara. International Journal of Engineering*. – 2020. № 18. – P. 101–108 (Index Copernicus) (досліджено вплив концентраторів напружень у виливках на формування технологічних пошкоджень).

21. Kusiі J., Kuk A. Investigation of the technological damageability of castings at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. № 1426 (1). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1426/1/012034/pdf> (Scopus) (досліджено технологічну пошкоджуваність виливок на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва у життєвому циклі виробу).

22. Kusiі Ya., Kuk A., Onysko O., Lukan T., Pituley L., Shuliar I., Havryliv Y. Application of the criterion of technological damageability in mechanical engineering. *STED Journal*. – 2020. № 2 (2). – P. 13–21 (проаналізовано критерій технологічної пошкоджуваності при застосуванні принципу функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів).

23. Kusiі Ya., Stupnytskyu V. Optimization of the technological process based on analysis of technological damageability of castings. *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Design, simulation, manufacturing: the innovation exchange : proceedings of the 3rd International conference, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv, Ukraine*. – 2020. Vol. 1 : Manufacturing and Materials Engineering. – P. 276–284 (Scopus) (оптимізовано структуру технологічного маршруту оброблення алюмінієвих виливків).

24. Ya. M. Kusiі, V. V. Stupnytskyu, A. M. Kuk, V. G. Topilnytskyu Development of the fundamental diagram of the formation and transformation of the products properties during their manufacturing *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Volume 1781. –

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1781/1/012027> (Scopus)
(розроблено принципову схему формування та перетворення властивостей виробів під час їх виготовлення).

Публікації у матеріалах наукових конференцій

25. Кусий Я. М., Кузін О. А. Оцінка технологічної пошкоджуваності виливків за параметрами розсіювання характеристик твердості // Прогресивні технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. VI Міжнар. наук.-практ. конф., Львів–Звенів (Карпати), 6–10 лютого, 2017 р. – 2017. – С. 62–65.

26. Кусий Я. М., Кузін О. А., Топільницький В. Г. Оцінка пошкоджуваності заготовок після лиття в піщані форми // 13-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові : матеріали симпозиуму, Львів, 18–19 травня 2017 р. – 2017. – С. 160–161.

27. Кусий Я. М., Кузін О. А., Винар В. А, Рацька Н. Б. Використання методу LM – твердості для визначення технологічної пошкоджуваності виливків // Прогресивні технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. VII Міжнар. наук.-практ. конф., Львів–Звенів (Карпати), 5–9 лютого, 2018 року. – 2018. – С. 72–75.

28. Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Вібраційно-відцентрове зміцнення деталей нафтогазовидобувного обладнання // Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу : матер. II Міжнар. наук.-техн. конф. (Івано-Франківськ, 24–27 квітня 2018 р.). – 2018. – С. 324–327.

29. Kusyi Y., Kuk A. Analysis of the rational route of aluminium alloy castings mechanical treatment on the basis of the reliability criterion // International conference on applied sciences : book of abstracts, May 9–11 2019, Humedora. – 2019. – P. 41.

30. Kusyi Y., Kuk A., Kostiuk O. Use of vibration technologies for ensuring quality parameters of products surfaces // Thermal science and engineering of Serbia : book of abstracts 19th International conference, Sokobanja, Serbia, October 22–25 2019. – 2019. – P. 142.

31. Кусий Я. М., Королюк А. М. Вибір раціонального маршруту оброблення виливок за допомогою методу LM-твердості // Пріоритети сучасної науки : матер. III Міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 листопада 2019 року, Київ. – 2019. – С. 30–33.

32. Кусий Я. М., Королюк А. М., Романюк М. А., Ляшеник І. Т. Застосування вібраційних технологій для забезпечення параметрів якості виробів // Перспективи розвитку сучасної науки та освіти : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 13–14 листопада 2019 року, Львів. – 2019. – С. 23–25.

33. Кусий Я. М., Кузін О. А. Роль розміщення елементів конструкції у формуванні технологічних пошкоджень виливка // Прогресивні технології у машинобудуванні : матер. доповідей VIII Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ – Яремче, 4–8 лютого 2019 року. – 2019. – С. 152–154.

34. Кусий Я. М., Ляшеник І. Т. Керування операцією вібраційно-відцентрового зміцнення з використанням SADT-технологій// Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 5–6 грудня 2019 р., Львів. – 2019. – С. 33–36.

35. Kusyi Ya. Analyze of the blank production in the life cycle of a part by means of the technological inheritability // “GOAL AND ROLE OF WORLD SCIENCE IN

MODERNITY”): матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф., 09–10 березня 2020 р., Гельсінкі, Фінляндія. – 2020. – Р. 170–174.

36. Kusyi Ya., Kuk A., Onysko O., Lukan T., Pituley L., Shuliar I., Havryliv Y. Application of the criterion of technological damageability in mechanical engineering // Social and technological development : book of abstracts VIII International conference, Banja Luka, Trebinje, October 09–10, 2020, Republic of Srpska, B&H. – 2020. – Р. 56.

37. Kusyi Ya., Lychak O., Radu S., Moraru R., Kojić D. Research of the finishing and strengthening technological operations by using SADT-technologies // Прогресивні технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. IX Міжнар. наук.-практ. конф., Львів–Плай (Карпати), 3–7 лютого, 2020 року. – 2020. – Р. 27–30.

38. Kusyi Y., Stupnytskyu V. Optimization of the technological process based on analysis of technological damageability of castings // Design, simulation, manufacturing: the innovation exchange : proceedings of 3rd International conference. – 2020. – Р. 82.

39. Кусий Я. М. Аналіз закономірностей технологічного успадковування при виготовленні виробів // Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти : матер. міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 22–23 січня 2020 р.). – 2020. – С. 61–63.

40. Кусий Я. М., Личак О. В., Топільницький В. Г. Удосконалення структурної моделі життєвого циклу вибору із врахуванням технологічного успадковування параметрів матеріалу // Теоретичні та прикладні аспекти розвитку науки : матер. V Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 30–31 січня 2020 р.). – 2020. – С. 26–29.

41. Кусий Я. М., Ступницький В. В., Кук А. М., Топільницький В. Г. Розроблення концептуальної схеми формування раціональних параметрів якості у життєвому циклі машини // Прогресивні технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. IX Міжнар. наук.-практ. конф., Львів–Плай (Карпати), 3–7 лютого, 2020 року. – 2020. – С. 107–110.

42. Кусий Я. М., Чернишенко Я. В. Проектування функціонально-орієнтованих технологічних процесів з використанням SADT-технологій // Priority directions of science and technology development : abstracts of the 4th International scientific and practical conference, Kyiv, Ukraine, December 20-22, 2020. – 2020.– Р. 426–432.

43. Ціж А. С., Кусий Я. М. Оптимізація маршруту оброблення поверхонь заготовки за допомогою критерію технологічної пошкоджуваності матеріалу // Сучасний стан та перспективи розвитку науки : матер. Міжнар. студ. наук. конф. (Ужгород, 18 грудня 2020 р.) / Молодіжна наукова ліга. – 2020. – С. 68–74.

44. Кусий Я. М., Погорілий Ю. О. Функціонально-орієнтоване проектування операцій при виготовленні виробів // Development and implementation of technologies in production: abstracts of the V International Scientific and Practical Conference, Leeuwarden, Netherlands, March 12–13, 2021. – 2021. – Р. 78–80.

45. Кусий Я. М., Погорілий Ю. О. Технологічне успадковування властивостей виробів в умовах самоорганізації технічних систем. // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні : матер. Міжнар. наук.-техн. конф., Дніпро, Україна, 16–18 березня 2021. – 2021.– С. 301–304.

46. Кусий Я. М., Погорілий Ю. О. Вібраційно-відцентрове зміцнення циліндрових втулок бурових pomp // Сучасні технології у промисловому виробництві : матер. VIII Всеукр. наук.-техн. конф., Суми, 20–23 квітня 2021 р. – 2021. – С. 46–47.

47. Широков В. В., Афтаназів І. С., Боровець В. М., Кук А. М., Кусий Я. М. : Розроблення технологічного оснащення для покращення експлуатаційних характеристик деталей нафтогазовидобувного обладнання. // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : матер. X-ой Промышленной конференции с международным участием, Славское, 2010. – 2010. – С. 243–246.

48. Кусий Я. М., Топільницький В. Г., Василів Х. Б., Широков О. В. : Оцінка зміни рельєфу віброзміцнених втулок бурових pomp НБ32. // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: матер. XII-ой Промышленной конференции с международным участием, Плавья/Карпаты, 2012. – 2012. – С. 127–131.

49. Кусий Я. М. Контроль показників для оцінки довговічності деталей. // Прогресивні технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. III-ї Всеукр. наук.-техн. конф., Львів/Карпаты, 2015. – 2015. – С. 60–62.

50. Кусий Я. М., Кузін О. А.: Роль структури литих заготовок у формуванні пошкодженості при механічній обробці. // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матер. тринадцятої Міжнар. наук.-техн. конф., 2–4 червня 2015 року. – 2015. – С. 59.

51. Кусий Я. М., Кузін О. А., Топільницький В. Г. Роль технологічних пошкоджень у формуванні поверхневих концентраторів напружень литих заготовок. In: V-а Прогресивні технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. Всеукр. наук.-техн. конф., Львів/Карпаты, 2016. – 2016. – С. 57–60.

52. Кусий Я., Кук А., Арендар Л. Вплив режимів вібраційно-відцентрового зміцнення на геометричні параметри якості поверхні нежорстких циліндричних деталей. // 9-ий Міжнар. симпозіум укр. інженерів-механіків у Львові : праці, КІНПАТРИ ЛТД, Львів, 2009. – С. 194–196.

53. Кусий Я., Кузін О., Топільницький В. Вплив умов отримання виливків на формування технологічних пошкоджень. // 12-ий Міжнар. симпозіум укр. інженерів-механіків у Львові : праці, КІНПАТРИ ЛТД, Львів, 2015. – 2015. – С. 115–116.

АНОТАЦІЯ

Кусий Я. М. Науково-прикладні основи технологічного успадкування параметрів якості для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (131 Прикладна механіка). – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему технології машинобудування – розроблення узагальненого методологічного

підходу, що реалізує технологічне успадковування параметрів якості під час вибору структури технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів із врахуванням комплексу властивостей матеріалу, параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик та регламентованих показників надійності відповідно до службового призначення. Обґрунтовано вибір критерію гомогенності матеріалу виробу для аналізу технологічного успадковування регламентованих параметрів його якості під час його виготовлення. Розроблено взаємозв'язки та закономірності у різновидах підсистем системи аналізу формоутворення об'єкта машинобудівного виробництва (PSPAS-системи), які враховують технологічне успадковування параметрів якості виробів за критерієм однорідності матеріалу. Розроблено та реалізовано під час оброблення сталевих і алюмінієвих заготовок виробів методику проектування технологічних маршрутів оброблення їхніх виконавчих поверхонь із використанням гомогенності (однорідності) матеріалу для аналізу технологічного успадковування властивостей. Адаптовано обладнання об'ємної вібраційної обробки для методу вібраційно-відцентрового оброблення під час виготовлення втулок циліндрових бурових pomp НБ-32 із застосуванням принципу ФОП, розроблено технологічне оснащення для його реалізації, що дозволило підвищити у середньому на 65 % середнє напрацювання до відмови віброзміцнених втулок за заміни матеріалу вхідної заготовки із сталей 70, 40Х на сталі 20, 45. Реалізовано методику дослідження технологічного забезпечення параметрів якості виробів як результат технологічного успадковування у технологічній системі «металорізальний верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» під час виготовлення деталей машин.

Ключові слова: технологічне успадковування, гомогенність, технологічна пошкоджуваність, технологічна система, константа матеріалу

АННОТАЦІЯ

Кусый Я. М. Научно-прикладные основы технологического наследования параметров качества для обеспечения эксплуатационных характеристик изделий. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения (131 Прикладная механика). – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2021.

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная проблема технологии машиностроения – разработка обобщенного методологического подхода, который реализует технологическое наследования параметров качества при выборе структуры технологического процесса изготовления машиностроительных изделий с учетом комплекса свойств материала, параметров качества поверхностей и поверхностного слоя деталей машин для обеспечения их эксплуатационных характеристик и регламентированных показателей надежности в соответствии со служебным назначением. Обоснован выбор критерия гомогенности материала изделия для анализа технологического наследования регламентированных параметров его качества при изготовлении. Разработаны взаимосвязи и закономерности в разновидностях подсистем системы анализа формообразования объекта машиностроительного производства (PSPAS-системы),

учитывающих технологическое наследования параметров качества изделий по критерию однородности материала. Разработана и реализована при обработке стальных и алюминиевых заготовок изделий методика проектирования технологических маршрутов обработки их исполнительных поверхностей с использованием гомогенности (однородности) материала для анализа технологического наследования свойств. Адаптировано оборудование объемной вибрационной обработки для метода вибрационно-центробежной обработки при изготовлении втулок цилиндрических буровых насосов НБ-32 с применением принципа ФОР, разработана технологическая оснастка для его реализации, что позволило повысить в среднем на 65% среднюю наработку до отказа виброупрочненных втулок при замене материала заготовки из стали 70, 40Х на сталь 20, сталь 45. Реализована методика исследований технологического обеспечения параметров качества изделий как результат технологического наследования в технологической системе «металлорежущий станок – устройство – инструмент – деталь (заготовка)» при изготовлении деталей машин.

Ключевые слова: технологическое наследования, гомогенность, технологическая повреждаемость, технологическая система, константа материала

SUMMARY

Kusyi Ya. M. SCIENTIFIC AND APPLIED BASICS OF THE TECHNOLOGICAL INHERITABILITY OF THE QUALITY PARAMETERS FOR PROVIDING OF THE PRODUCTS OPERATION CHARACTERISTICS. – On rights of a manuscript.

Thesis for doctor degree in technical sciences by speciality 05.02.08 – mechanical engineering. – Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

In Chapter I, the principles of object-oriented and functionally-oriented technological processes planning for the manufacture of mechanical-engineering products are analyzed. Investigations of scientists in the development of technological inheritability and heredity in mechanical engineering has been established. The role of the technological object, technological system, technological environment in the manufacture of mechanical-engineering products is generalized. It is established that the processed material and parameters of surface layers of products as carriers of the inherited information provide requirements of the design and technological documentation after the certain technological transition, operation and technological process. The main types of failures associated with the imperfection of technological processes for the manufacture of mechanical-engineering products are presented. It is established that the traditional approaches to the technological support of the operational characteristics of machine products during machining and pressure treatment for modern mechanical engineering are imperfect and require theoretical and experimental research.

Chapter II is devoted to the development of methods for providing the initial parameters of products for the principles of object-oriented and function-oriented technological processes planning. The priority of the criterion of homogeneity of the material for the study of technological inheritability of product quality parameters and control of process parameters is justified. Parameters characterizing the homogeneity of

the product material by scattering the characteristics of its hardness: Weibull homogeneity coefficient (m), material constant A_m and technological damageability D , are determined to develop a rational variant of the technological route of surface treatment of machine products. A schematic diagram of the technological process of manufacturing a product taking into account the technological inheritability of regulated parameters of product quality and parameters for assessing the homogeneity of its material in the technological chain “input workpiece-output product” is proposed. The principles of technological inheritability of product quality parameters in the conditions of self-organization of technological systems for object-oriented and functionally-oriented technological processes planning are developed. The use of the mathematical apparatus of the description of Markov processes to provide the regulated parameters of the quality of the workpiece, taking into account the influence of the elements of the technological system on a certain technological operation of manufacturing the product is justified. Conditions for providing the efficiency of the elements of the technological system in the performance of technological tasks are defined.

Chapter III is devoted to practical issues of technological inheritability of mechanical-engineering products quality parameters during technological routes planning for their surfaces processing by the criterion of the material homogeneity. Control of the workpieces parameters of the mechanical-engineering products according to the homogeneity criterion of their materials is realized for workpiece of steel shaft, steel casting of trolley bar support bracket, prismatic castings from aluminum alloys in the metal mold and sand-clay molds. The structure and intensity of formation of technological defects were studied in the surface layer of aluminum castings in sand-clay molds by means of the electron microscope ZEISS EVO 40XVP. The algorithm of rational choice of the product blank on the basis of the criterion of homogeneity of its material is presented. Based on the proposed algorithm, the rational structures of the routes of surface treatment of machine parts are developed according to the parameters of homogeneity of their material: Weibull homogeneity coefficients (m), material constants A_m , technological damage D . After each technological transition the quality parameters of certain machine providing technical requirements on the homogeneity criterion of their material. The influence of the main technological equipment and tools on the technological inheritability of the surface layer and material parameters of aluminum castings in sand-clay forms has been researched.

In Chapter IV, the principles of functionally-oriented technological processes planning of products manufacturing are improved. The technological process of manufacturing the sleeve of the cylinder drilling pump NB32 is developed using the principles of functionally-oriented design. Volumetric vibration treatment equipment is adapted to implement the method of vibration-centrifugal strengthening of cylinder drill pump bushings. The schematic diagram of the charter for the application of vibration-centrifugal reinforcement on a three-dimensional vibrating machine is given. Technological equipment for the implementation of vibration-centrifugal hardening has been developed. When implementing the principle of functionally-oriented design, vibration treatment of the executive surface of the sleeve with its modification by a hard alloy is carried out. The practice of using the principle of functionally-oriented design in

the manufacturing of bushings for cylinder pumps NB32 tested during field tests. The average failure time of vibration-reinforced bushings increased by an average of 65 %.

Chapter V is devoted to the investigations of the technological support of product quality parameters as a result of technological inheritability in the technological system during cutting. The algorithm of formation of the regulated parameters of product quality taking into account reliability of technological system is developed. The mathematical apparatus of Markov chains is used to model the provision of quality parameters in the operations of the technological process of manufacturing the cast iron housing of the gearbox K 02.106, taking into account the influence of elements of the technological environment: device-tool-machine. The system of Kolmogorov-Chapman differential equations is developed for all technological operations and boundary conditions are established. As a result of solving the system of differential equations, the probability of providing the the product regulated parameters for each technological operation, provided that the limit states are not reached by the metal-cutting machine, the device on the metal-cutting machine and the metal-cutting tool in general and their elements in particular. In addition, for each technological operation, the probability of failure to provide the regulated parameters of the workpiece for each technological operation, provided that the limit state of the elements of the technological environment is calculated. It is established that the control of the process for providing the reliability of the technological system elements on a certain technological operation of the technological process of the product manufacturing is possible by optimizing the failure rate of the technological environment elements. At the same time, the optimization of failure values of the metal-cutting tool and the rational choice of cutting modes allows you to control the process of ensuring the reliability of the elements of the technological system at a certain technological transition technological operation of the product manufacturing process. The method of designing a rational structure of the technological route of the products executive surfaces processing by the homogeneity criterion is developed.

Keywords: technological inheritability, homogeneity, technological damageability, technological system, material constant.