

Національний університет «Львівська політехніка»

Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

Кусий Ярослав Маркіянович

УДК 658.511.4:621.7

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Я.М. Кусий

Науковий консультант –

Ступницький Вадим Володимирович,
доктор технічних наук, доцент

**Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:**

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доц.

Ю.П. Шоловій

Львів – 2021

АНОТАЦІЯ

Кусий Я.М. Науково-прикладні основи технологічного успадкування параметрів якості для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів. – Кваліфікаційна наукова праця 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», Львів, 2021.

У першому розділі проаналізовано принципи об'єктно- та функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів виготовлення машинобудівних виробів. Окреслено внесок вчених у розвиток технологічного успадкування та спадковості в машинобудуванні та механообробці. Узагальнено роль технологічного об'єкта, технологічної системи, технологічного середовища під час технологічного успадкування параметрів машинобудівних виробів. Встановлено, що оброблюваний матеріал і параметри поверхневих шарів виробів, як носії успадкованої інформації, уточнюють параметри заготовки виробу після кожного технологічного переходу, операції зокрема та технологічного процесу загалом, забезпечуючи вимоги конструкторсько-технологічної документації.

Проаналізовано основні види відмов, що пов'язані з недосконалістю технологічних процесів виготовлення машинобудівних виробів. Встановлено, що найменш дослідженими є відмови, які пов'язані із залишковими та побічними явищами під час виготовлення виробів, зокрема, еволюцією технологічних дефектів і технологічним успадкуванням.

Досліджено вплив параметрів якості поверхневого шару деталей машин на формування їхніх основних експлуатаційних характеристик: зносостійкості, втомної міцності, тримкої здатності тощо. Відзначено наукові здобутки вчених у дослідженні впливу геометричних і фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару деталей машин на їх експлуатаційні характеристики, оптимізації параметрів мікрорельєфу, розробленні наукових основ системного проектування технологічних процесів обробки виробів при застосуванні принципу функціонально-орієнтованого проектування, розробленні методів поверхневого пластичного

деформування та вібраційних технологій для забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів.

Проаналізовано традиційні підходи до технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик деталей машин під час механічного оброблення та оброблення тиском, які на сьогоденньому етапі розвитку машинобудування є недосконалими та потребують теоретико-експериментальних досліджень.

Визначено умови формування пошкоджуваності/пошкоженості виробів від тривалості процесів, які супроводжують стадії розроблення та експлуатації виробів, розглянуто сучасні методи аналізу пошкоджуваності матеріалу виробів.

Відзначено переваги методу LM-твердості, який розроблений у Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України під керівництвом академіка А. О. Лебедева та застосовується для аналізу пошкоженості матеріалу виробів під час їхньої експлуатації без врахування умов формування регламентованих параметрів деталей машин на стадії розроблення у їхніх життєвих циклах.

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 загальною 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 покладено в основу узагальненого методологічного підходу технологічного успадковування параметрів

якості деталей машин для забезпечення їх експлуатаційних характеристик за критерієм однорідності (гомогенності) матеріалу.

Обґрунтовано гомогенність матеріалу як параметра для аналізу технологічного успадковування характеристик поверхонь оброблюваних виробів. Визначено параметри, які характеризують гомогенність (однорідність) матеріалу виробу за розсіюванням характеристик його твердості: коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m), константу матеріалу A_m , технологічну пошкоджуваність D і інтенсивність її зростання j_D для проєктування раціонального варіанту технологічного маршруту оброблення поверхонь деталей машин. Розроблено принципову схему технологічного процесу виготовлення виробу із врахуванням технологічного успадковування регламентованих параметрів якості виробу і параметрів для оцінки однорідності його матеріалу у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – вихідна деталь».

Проаналізовано взаємозв'язки між характеристиками машинобудівних виробів на стадії розроблення їхніх життєвих циклів та визначено важливість дослідження регламентованих показників надійності для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів. Визначено необхідність дослідження деградованих відмов, які призводять до технологічної пошкоджуваності матеріалу виробів, що у їхніх життєвих циклах визначається еволюцією технологічних дефектів.

Розроблено структуру та методичного забезпечення системи аналізу формоутворення виробу (PSPAS-системи – Product Shaping/Processing Analysis System) в умовах самоорганізації технологічних систем.

Представлено критерій однорідності матеріалу (КОМ) для аналізу технологічного успадковування параметрів якості деталей під час їхнього виготовлення методами різання, пластичного деформування та контролю властивостей поверхневого шару методом LM-твердості.

Розроблено принципову схему дослідження впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на формування регламентованих параметрів якості заготовки виробу на стадії його розроблення у життєвому циклі. Обґрунтовано застосуванням математичного апарату опису марковських процесів для забезпечення

регламентованих параметрів якості заготовки деталі із врахуванням впливу елементів технологічної системи на технологічних переходах і технологічних операціях виготовлення виробу. Визначено умови забезпечення працездатності елементів технологічної системи ВПД(З) під час виконання технологічних завдань.

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

За розробленою у розділі 2 методикою реалізовано контроль параметрів заготовок деталей машин за критерієм гомогенності їхніх матеріалів. Зокрема, для заготовок сталевих валів 6Е4-2717.00.00.01 із сортового прокату, які виготовляють на ТзОВ «Транссистем» (м. Львів), із використанням методу LM-твердості визначено параметри однорідності матеріалу: коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m) і константи матеріалу A_m для осьових перерізів під шийки. Малі значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла $m=6,123-11,457 \rightarrow 0$ та значення констант для сталі 40Х $A_m=0,814-0,892 < 0,9$ свідчать про низьку впорядкованість структури поверхневого шару та високу її схильність до технологічної пошкоджуваності.

Під час контролю параметрів сталевого виливка кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса, що виготовляють на ТзОВ «ІнтерПЕТ» (м. Львів), визначені згідно методу LM-твердості коефіцієнти гомогенності Вейбулла $m=4,3368-6,010 \rightarrow 0$ і константи для сталі 25 Л $A_m=0,756-0,712 < 0,9$ вказують на наявність значної кількості технологічних дефектів у поверхневих шарах заготовок.

Аналогічні результати підтверджуються і для призматичних виливок із алюмінієвих сплавів у кокіль та піщано-глинисті форми.

Досліджено структуру та інтенсивність формування технологічних дефектів у поверхневому шарі алюмінієвих виливок у піщано-глинисті форми на електронному мікроскопі ZEISS EVO 40XVP.

Представлено алгоритм раціонального вибору заготовки виробу на підставі критерію гомогенності її матеріалу. На підставі запропонованого алгоритму

розроблено раціональні структури маршрутів оброблення виконавчих і спряжених поверхонь заготовок вала 6E4-2717.00.00.01, кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса, призматичних виливок із алюмінієвого сплаву за показниками гомогенності їхнього матеріалу: коефіцієнтами гомогенності Вейбулла (m), константами матеріалу A_m , технологічною пошкоджуваністю D і інтенсивністю зростання технологічної пошкоджуваності j_D . Після кожного технологічного переходу уточнюються параметри якості визначених поверхонь деталей машин згідно принципу технологічного успадковування для забезпечення технічних вимог за показниками гомогенності їхнього матеріалу.

Досліджено вплив основного технологічного обладнання та інструменту на технологічне успадковування параметрів поверхневого шару і матеріалу алюмінієвих виливок у піщано-глинисті форми.

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)

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

Розроблено технологічний процес виготовлення втулки циліндрової бурової помпи НБ-32 із використанням принципів функціонально-орієнтованого проектування. Адаптовано обладнання об'ємного вібраційного оброблення для реалізації методу вібраційно-відцентрового зміцнення втулок циліндрових бурових pomp. Наведено принципову схему установки для застосування вібраційно-відцентрового зміцнення на вібромашині об'ємного оброблення та

розроблено технологічне оснащення для його реалізації. При реалізації принципу функціонально-орієнтованого проєктування здійснено віброоброблення виконавчої поверхні втулки із її модифікуванням твердим сплавом.

Практику застосування принципу функціонально-орієнтованого проєктування під час виготовлення втулок циліндрових pomp НБ-32 апробовано на етапі 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. Розраховано інтенсивності відмов для елементів технологічного середовища: металорізальних верстатів, верстатних пристроїв і металорізальних інструментів на кожній технологічній операції. В результаті розв'язку системи диференціальних рівнянь розраховано ймовірності забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу на кожній технологічній операції за умови недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним інструментом загалом та їх елементами зокрема. Крім того для кожної технологічної операції розраховано ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу на кожній технологічній операції за умови досягнення граничного стану елементами технологічного середовища (ПІВ).

За результатами математичного моделювання встановлено, що при обробленні корпусу редуктора К 02.106 ймовірності забезпечення його регламентованих параметрів якості на операціях механічного оброблення при недосягненні граничного стану елементами технологічного середовища (ПІВ) змінюються від 0,7862 до 0,9963. Відповідно ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора за умови досягнення граничного стану ПІВ на операціях механічного оброблення змінюються від 0,0037 до 0,2138. При цьому найбільший вплив на незабезпечення регламентованих параметрів якості корпусу

редуктора на технологічних операціях його виготовлення має металорізальний інструмент, а найменший – металорізальний верстат.

Розв'язано оптимізаційну задачу синтезу режимів оброблення для проектування технологічного процесу виготовлення виробів. За результатами розв'язання оптимізаційної задачі у середовищі Mathcad встановлено граничні значення основного часу та визначено оптимальні режими оброблення для механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106.

На підставі розробленої методики врахування 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 їх якості. Визначено середнє та граничне значення ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів якості при їх механічному обробленні 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 при їх механічному обробленні за умови досягнення граничного стану верстатом, пристроєм на верстаті та металорізальним інструментом становить 23,5 % або 0,235, що забезпечує коефіцієнт запасу точності 1,235.

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

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 technological equipment and tools on the technological inheritability of the surface layer and material parameters of aluminum castings 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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Розділ у колективній монографії

1. Ya. Kusyi, O. Lychak, A. Kuk, O. Kostyuk, Iu. 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 заготовельного виробництва у структурній моделі життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадковування).

Статті у наукових фахових виданнях України:

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

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

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

5. 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).

6. Кусий Я. М., Личак О. В., Онисько, О. Р. Розроблення структурної моделі життєвого циклу виробу з позиції механіки технологічного успадковування. *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 успадковування його властивостей).

7. 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).

8. 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*).

9. 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*).

10. 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*).

11. 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*).

12. 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:

13. Kusyj 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*).

14. Kusyj J., Kuk A., Topilnytskyy 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*).

15. Kuzin O., Kusyj 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 методу визначення технологічної пошкоджуваності виливків).

16. 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).

17. 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*).

18. 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).

19. 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 No 7 (73). – С. 41-51 (*Scopus*) (адаптовано обладнання об'ємного вібраційного оброблення для реалізації методу вібраційно-відцентрового зміцнення деталей машин форми тіл обертання).

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

20. Kusiya, 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. Kusiya 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. Kusiya 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. Kusiya 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. Kusyi, 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, Hamedora. – 2019. – P. 41.

30. Kusyi Y., Kuk A., Kostyuk 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., Королук А. М. Вибір раціонального маршруту оброблення виливків 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., Королук 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. Kusiya 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. Kusiya 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. Kusiya 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. Kusiya 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. – P. 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/Карпати, 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/Карпати, 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.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| Перелік умовних скорочень і термінів | 25 |
| ВСТУП | 29 |
| РОЗДІЛ 1. Аналіз сучасного стану технологічного успадковування параметрів якості машинобудівних виробів для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик | 39 |
| 1.1. Аналіз технологічного успадковування в процесі виготовлення виробів | 39 |
| 1.1.1. Технологічне успадковування у структурі технологічного процесу виготовлення деталей машин | 39 |
| 1.1.2. Технологічне успадковування параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності | 45 |
| 1.2. Технологічне забезпечення службового призначення машинобудівних виробів, класифікація їхніх з'єднань і поверхонь | 51 |
| 1.3. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності машинобудівних виробів | 55 |
| 1.3.1. Аналіз підходів для забезпечення експлуатаційних характеристик деталей машин | 55 |
| 1.3.2. Структура інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва | 61 |
| 1.4. Характеристика основних критеріїв для принципів об'єктно- і функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів під час виготовлення машинобудівних виробів | 71 |
| 1.5. Технологічне успадковування параметрів якості виробів у структурі технологічного процесу їхнього виготовлення | 78 |
| 1.5.1. Технологічне успадковування параметрів матеріалу виробів для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик | 78 |

| | |
|---|------------|
| 1.5.2. Аналіз умов порушення гомогенності (однорідності) матеріалу виробу | 84 |
| 1.5.3. Сучасні методи аналізу порушення гомогенності матеріалу виробів за ступенем його пошкоджуваності | 87 |
| 1.5.4. Аналіз пошкоджуваності та пошкодженості матеріалу виробів методом LM-твердості | 92 |
| 1.6. Висновки розділу 1 | 96 |
| 1.7. Мета та основні завдання дисертаційної роботи | 98 |
| РОЗДІЛ 2. Методологія технологічного успадковування параметрів якості деталей машин за критерієм однорідності їхнього матеріалу для забезпечення принципу функціонально-орієнтованого проєктування | 100 |
| 2.1. Розроблення методології проєктування сучасних технологічних процесів із використанням принципів об'єктно- та функціонально-орієнтованого проєктування | 100 |
| 2.2. Дослідження технологічного успадковування параметрів якості виробів за параметром гомогенності (однорідності) матеріалу | 108 |
| 2.2.1. Обґрунтування гомогенності матеріалу як параметра для аналізу технологічного успадковування характеристик поверхонь оброблюваних виробів | 108 |
| 2.2.2. Розроблення технологічного успадковування параметрів для принципів об'єктно- і функціонально-орієнтованого проєктування технологічних процесів | 122 |
| 2.3. Розроблення структури та методичного забезпечення системи аналізу формоутворення виробу в умовах самоорганізації технологічних систем | 127 |
| 2.4. Дослідження критерію однорідності матеріалу для аналізу процесів технологічного успадковування параметрів якості виробів для принципу функціонально-орієнтованого проєктування технологічних | |

| | |
|---|------------|
| процесів | 138 |
| 2.5. Технологічне забезпечення вихідних параметрів якості деталей машин на стадії їхнього розроблення у життєвих циклах із врахуванням впливу елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – заготовка» | 145 |
| 2.6. Висновки розділу 2 | 155 |
| Розділ 3. Технологічне успадковування параметрів якості виробів при проектуванні технологічних маршрутів оброблення їхніх поверхонь за критерієм гомогенності матеріалу | 159 |
| 3.1. Дослідження вхідних параметрів заготовки виробу за критерієм однорідності її матеріалу | 159 |
| 3.1.1. Контроль вхідних параметрів заготовки вала 6E4-2717.00.00.01 за критерієм однорідності її матеріалу | 162 |
| 3.1.2. Визначення вхідних параметрів заготовки кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса за критерієм однорідності її матеріалу | 164 |
| 3.1.3. Контроль вхідних параметрів алюмінієвих виливок у кокіль за критерієм однорідності їхнього матеріалу | 166 |
| 3.1.4. Визначення вхідних параметрів виливка у піщано-глинясті форми за критерієм однорідності його матеріалу | 168 |
| 3.1.5. Дослідження інтенсивності технологічних дефектів після формоутворення виливка в піщано-глинисті форми | 173 |
| 3.1.6. Розроблення алгоритму раціонального вибору заготовки виробу на підставі критерію однорідності її матеріалу | 176 |
| 3.2. Проектування раціонального маршруту оброблення виконавчих (функціональних) поверхонь деталей машин при аналізі технологічного успадковування їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу | 177 |
| 3.2.1. Розроблення раціональної структури маршрутів оброблення виконавчих (функціональних) поверхонь заготовки вала 6E4-2717.00.00.01 | |

| | |
|---|------------|
| при аналізі технологічного успадковування його параметрів за критерієм гомогенності матеріалу | 177 |
| 3.2.2. Проектування раціональної структури маршруту оброблення поверхонь сталевих виливків при аналізі технологічного успадковування їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу | 187 |
| 3.2.3. Розроблення раціональної структури маршруту оброблення поверхонь заготовок у кокіль із алюмінієвих сплавів при технологічному успадковуванні їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу | 192 |
| 3.2.4. Проектування раціональної структури маршруту оброблення поверхонь заготовок у піщано-глинисті форми із алюмінієвих сплавів при аналізі технологічного успадковування їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу | 196 |
| 3.2.5. Дослідження впливу основного технологічного обладнання та інструменту на технологічне успадковування параметрів поверхневого шару і матеріалу алюмінієвих виливок у піщано-глинисті форми при аналізі технологічного успадковування їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу | 199 |
| 3.3. Висновки розділу 3 | 206 |
| Розділ 4. Технологічні основи формування параметрів якості поверхонь виробів як результат роботи підсистем PSPAS–системи (Product Shaping/Processing Analysis System) | 212 |
| 4.1. Дослідження методів визначення експлуатаційних характеристик виконавчих (функціональних) поверхонь машинобудівних виробів | 212 |
| 4.1.1. Математичні моделі зносостійкості під час виготовлення машинобудівних виробів | 213 |
| 4.1.2. Дослідження впливу елементів системи ВПД на формування експлуатаційних характеристик виробів | 216 |
| 4.2. Розроблення технологічного процесу виготовлення втулки циліндрової бурової помпи НБ-32 з використанням принципів | |

| | |
|---|------------|
| функціонально-орієнтованого проектування | 225 |
| 4.2.1. Аналіз вхідних даних для розроблення ТП виготовлення втулки циліндрової бурової помпи | 225 |
| 4.2.2. Визначення лімітуючих функціональних поверхонь, аналіз характерних видів пошкоджень і обґрунтування вибору типу викінчувальної операції | 231 |
| 4.3. Технологічне забезпечення геометричних параметрів якості виконавчих (функціональних) циліндричних поверхонь деталей машин на викінчувально-зміцнювальних технологічних операціях пристроями з дебалансними приводами | 235 |
| 4.3.1. Розроблення технологічного оснащення для реалізації вібраційно-відцентрового оброблення при використанні вібромашин з дебалансним приводом | 235 |
| 4.3.2. Метрологічне забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні у системі «верстат – пристрій – інструмент – заготовка» на етапі виробництва стадії створення деталей машин у їхніх життєвих циклах | 239 |
| 4.3.3. Експериментальне дослідження технологічного успадковування параметрів якості (виконавчих) функціональних циліндричних поверхонь виробів | 246 |
| 4.3.4. Аналіз натурних випробувань втулок бурових pomp | 251 |
| 4.4. Висновки розділу 4 | 252 |
| Розділ 5. Дослідження технологічного забезпечення параметрів якості виробів як результат технологічного успадковування у технологічній системі | 257 |
| 5.1. Розроблення алгоритму формування регламентованих параметрів якості виробу із врахуванням впливу елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» | 257 |
| 5.2. Дослідження технологічного процесу виготовлення виробу з | |

| | |
|---|-----|
| позиції забезпечення надійності елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – заготовка» | 260 |
| 5.2.1. Забезпечення показників надійності основного технологічного обладнання при проєктуванні технологічних процесів виготовлення машинобудівних виробів | 261 |
| 5.2.2. Забезпечення показників надійності верстатних пристроїв на металорізальних верстатах при проєктуванні технологічних процесів виготовлення деталей машин | 265 |
| 5.2.3. Забезпечення показників надійності металорізальних інструментів під час проєктування технологічних процесів виготовлення машинобудівних виробів | 266 |
| 5.3. Дослідження процесу формування регламентованих параметрів якості виробу із врахуванням впливу технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» при виготовленні корпуса редуктора К.02.106 | 267 |
| 5.4. Дослідження інтенсивності відмов для елементів технологічної системи «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» | 273 |
| 5.4.1. Визначення інтенсивності відмов для основного технологічного обладнання (металорізальних верстатів) у системі «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» при виготовленні машинобудівних виробів | 272 |
| 5.4.2. Розрахунок інтенсивності відмов пристрою на металорізальному верстаті у системі «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» під час виготовлення машинобудівних виробів | 274 |
| 5.4.3. Визначення інтенсивності відмов металорізального інструменту у системі «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» під час виготовлення машинобудівних виробів | 275 |
| 5.5. Дослідження математичних моделей впливу елементів системи «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» на забезпечення регламентованих параметрів якості виробів | 276 |

| | |
|---|-----|
| 5.5.1. Математичне моделювання забезпечення параметрів якості машинобудівного виробу на операціях технологічного процесу його виготовлення | 276 |
| 5.5.2. Оптимізаційний синтез параметрів технологічного процесу виготовлення корпуса редуктора К 02.106 | 291 |
| 5.6. Дослідження забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні із врахуванням впливу структури технологічних маршрутів оброблення заготовки (деталі) у системі «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» на етапі виробництва деталей машин у їхніх життєвих циклах | 297 |
| 5.7. Висновки розділу 5 | 300 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 303 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 309 |
| ДОДАТКИ | 341 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ALARA – (англ. «as low as risk acceptable»), концепція «прийнятної ризику»;

CAE – (англ. Computer Aided Engineering), автоматизована система інженерних розрахунків;

CAF – (англ. Computer Aided Forming), автоматизована система аналізу формоутворення;

CAF-A – (англ. Computer Aided Forming – Assembly), автоматизована підсистема аналізу формоутворення виробу методом складання;

CAF-C – (англ. Computer Aided Forming – Cutting), автоматизована підсистема аналізу формоутворення виробу обробкою різанням;

CAF-P – (англ. Computer Aided Forming – Plastic deformation), автоматизована підсистема аналізу формоутворення виробу методом пластичного деформування;

CAF-S – (англ. Computer Aided Forming – Surface), автоматизована підсистема аналізу модифікування поверхневого шару виробу;

CAF-SC – (англ. Computer Aided Forming – Surface Coating), автоматизована підсистема нанесення поверхневих мікро- та нанопокрив;

CAF-SHT – (англ. Computer Aided Forming – Surface Heat Treatment), автоматизована підсистема аналізу поверхневого термічного оброблення;

CAF-SPD – (англ. Computer Aided Forming – Surface Plastic Deformation), автоматизована підсистема аналізу формоутворення виробу поверхневим пластичним деформуванням;

CAF-VPD – (англ. Computer Aided Forming – Volumetric Plastic Deformation), автоматизована підсистема аналізу формоутворення виробу об'ємним пластичним деформуванням;

CALS – (англ. Continuous Acquisition and Life Cycle Support), інформаційна підтримка життєвого циклу виробу;

CAM – (англ. Computer Aided Manufacturing), автоматизоване програмування для верстатів з ЧПК;

CAPE – (англ. Concurrent Art-to-Product Environment), паралельний інжиніринг та освоєння виробництва;

CAPP – (англ. Computer Aided Process Planning), автоматизована система технологічного проектування;

FMEA – (англ. Failure mode and effect analysis), аналіз характеру і наслідків відмов;

FTA – (англ. Fault tree analysis), аналіз дерева відмов;

MCAD – (англ. Mechanical Computer-Aided Design), автоматизоване проектування механічних пристроїв і їх елементів;

PLM – (англ. Product LifeCycle Management), керування життєвим циклом виробу;

PLS – (англ. Product Life Cycle Support), забезпечення життєвого циклу виробу;

PSPAS – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System), система аналізу формоутворення виробу;

PSPAS-A – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Assembly), підсистема аналізу формоутворення виробу методом складання;

PSPAS-C – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Cutting), підсистема аналізу формоутворення виробу обробкою різанням;

PSPAS-P – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Plastic deformation), підсистема аналізу формоутворення виробу методом пластичного деформування;

PSPAS-S – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Surface), підсистема аналізу модифікування поверхневого шару виробу;

PSPAS-SC – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Surface Coating), підсистема аналізу формоутворення виробу нанесенням поверхневих мікро- та нанопокриттів;

PSPAS-SHT – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Surface Heat Treatment), автоматизована підсистема аналізу поверхневого термічного оброблення;

PSPAS-SPD – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Surface Plastic Deformation), підсистема аналізу формоутворення виробу поверхневим пластичним деформуванням;

PSPAS-SPD/S/TI – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Subsystem combining Surface Plastic Deformation, Surface treatment and Technological Inheritability), підсистема модифікування поверхні при поверхневому пластичному деформуванні (комбінований метод оброблення);

PSPAS-VPD – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Volumetric Plastic Deformation), підсистема аналізу формоутворення виробу об'ємним пластичним деформуванням;

PSPAS-TI – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Technological Inheritability), підсистема аналізу технологічного успадковування при формоутворенні виробу;

PSPAS-TIHMB – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Technological Inheritability using Homogeneity of Material parameters of Blank), підсистема аналізу гомогенності матеріалу вхідної заготовки при технологічному успадковуванні;

PSPAS-TIHMW – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Technological Inheritability using Homogeneity of Material parameters during Workpiece forming), підсистема аналізу гомогенності матеріалу при формоутворенні заготовки виробу при технологічному успадковуванні;

PSPAS-TIM – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Technological Inheritability using Material parameters), підсистема аналізу технологічного успадковування за характеристиками матеріалу виробу;

PSPAS-TIS – (англ. Product Shaping/Processing Analysis System – Technological Inheritability using Surface parameters), підсистема аналізу технологічного успадковування за параметрами поверхневого шару виробу;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

БД – база даних;

БЗ – база знань;

ВВЗ – вібраційно-відцентрове оброблення (обробка);

ВВО_а – вібраційно-відцентрове оброблення, адаптоване під обладнання об'ємної вібраційної обробки;

ВПД(З) – технологічна система «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)»;

К – капітальний ремонт;

ККД – коефіцієнт корисної дії;
КТПВ – конструкторсько-технологічна підготовка виробництва;
МПр – пристрій на металорізальному верстаті;
МРВ – металорізальний верстат;
МРІ – металорізальний інструмент;
НДЛ-40 – науково-дослідна лабораторія № 40;
О – огляд;
ООП – об’єктно-орієнтоване проектування;
П – поточний ремонт;
ПШ – технологічне середовище «пристрій – інструмент – верстат»
ППД – поверхнєве пластичне деформування;
РЦВ – раціональний цикл випробувань;
С – середній ремонт;
ТП – технологічний процес;
ЄСКД – єдина система конструкторської документації;
ТУ – технічні вимоги;
ФОП – функціонально-орієнтоване проектування;
ЧПК – числове програмне керування;
М – матеріальні зв’язки (потоки тощо);
Е – енергетичні зв’язки (потоки тощо);
І – інформаційні зв’язки (потоки тощо);
ТО – технологічна операція;
МОР – мастильно-охолоджувальна різина;
ФОТ – функціонально-орієнтована технологія

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. 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 невідомих 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 при виготовленні деталей і аналізу процесу технологічного успадковування для забезпечення експлуатаційних характеристик відповідно до службового 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 виробництв 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 формоутворення, 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 формоутворення 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)» (ВПД(3)), для аналізу технологічних операцій та технологічних процесів виготовлення деталей машин.

8. Удосконалити методику проектування ТП 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 проєктування.

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 проєктування 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 вимірного 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 оброблюваних 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 оброблюваного 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, яка 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 оброблень 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 неупорядкованості його структури та подальшого проєктування технологічного маршруту оброблення поверхонь деталей машин для принципів ООП і ФОП ТП.

2. Запропоновано методику проєктування 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 ООП і ФОП 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 працемісткість 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, наведені в дисертації, отримані автором особисто. У спільних наукових роботах авторові належать: розроблення технологічного забезпечення параметрів якості поверхонь виробів у їх життєвих циклах [37, 46, 50, 241, 242, 248]; дослідження технологічного успадковування виробів під час реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування за критерієм гомогенності (однорідності) матеріалу [221, 240, 246, 247, 257]; аналіз впливу технологічних

режимів вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри якості поверхневого шару та показники надійності виробів [38, 42, 47, 229, 230, 239, 244, 245, 249, 250, 252, 253, 254, 255, 256]; розроблення методики визначення раціонального припуску за критерієм гомогенності (однорідності) матеріалу виробів [251]; дослідження впливу технологічного маршруту оброблення алюмінієвих виливків на формування їх міжзеренної пошкоджуваності [36, 39, 40, 41, 43, 44, 49, 228, 231, 233, 235, 236, 238]; дослідження впливу концентраторів напружень у виливках на формування технологічних пошкоджень за критерієм гомогенності (однорідності) матеріалу [48, 232, 234, 237, 243]. Формування проблеми, постановка 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 публікації 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 343 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 433 сторінки; з них 72 рисунки та 36 таблиць по тексту, а також додатки на 92 сторінках.

РОЗДІЛ 1.
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
УСПАДКОВУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ МАШИНОБУДІВНИХ
ВИРОБІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК

1.1. Аналіз технологічного успадковування під час виготовлення машинобудівних виробів

1.1.1. Технологічне успадковування у структурі технологічного процесу виготовлення деталей машин

Під технологічним успадковуванням у технології машинобудування розуміють явище перенесення властивостей заготовок деталей від попередніх технологічних операцій (ТО) (в рамках ТП) і технологічних переходів (в рамках ТО) до наступних під час їхнього оброблення методами лезового, абразивного оброблення, термооброблення, обробки тиском тощо, що визначає умови формування експлуатаційних властивостей і показників надійності виробів. Збереження цих властивостей у деталях машин називають технологічною спадковістю. Технологічне успадкування слугує узагальненим показником для визначення технологічного успадковування (процесу) та технологічної спадковості (характеристики) машинобудівного виробу [100, 258].

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

Технологічні процеси розроблення та виготовлення машинобудівних виробів мають безпосередній і вирішальний вплив на формування та зміну параметрів їхньої якості від виробництва заготовок до фінішних технологічних операцій виготовлення деталей на стадії розроблення та експлуатації виробів в їхніх життєвих циклах (рис. 1.1).

На підставі синергетичного підходу за рахунок самоорганізації технологічних систем під час виготовлення деталей і складання машин відбувається диференціація корисних (позитивних) і шкідливих (негативних) властивостей виробів згідно їх службового призначення, формуються технологічні бар'єри у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – готова деталь» при технологічному успадкуванні негативних властивостей матеріалу і за допомогою сформованих бар'єрів – забезпечується технологічне успадкування нових корисних властивостей [87].



Рис. 1.1. Життєвий цикл машинобудівного виробу

Дослідженню явищ технологічного успадкування в машинобудуванні та механообробці присвячено роботи наукових шкіл А. М. Дальського, П. І. Ящеріцина, Е. В. Риждова, їхніх учнів і послідовників [100, 116-121, 266-270, 273, 318-320].

Під час аналізу та оцінки технологічного успадкування властивостей виробів використовуються терміни «технологічний об'єкт», «технологічна система», «технологічне середовище» [100, 116].

Технологічний об'єкт – будь-який з об'єктів, в результаті взаємодії яких відбувається визначення або зміна стану предмета виробництва під час виготовлення машини та її складових [116].

Технологічну систему формує множина технологічних об'єктів, що взаємодіють між собою під час виготовлення деталей і складання машини. Розрізняють технологічні системи операцій (рис. 1.2), процесу, виробничого підрозділу, підприємства тощо [116, 319].

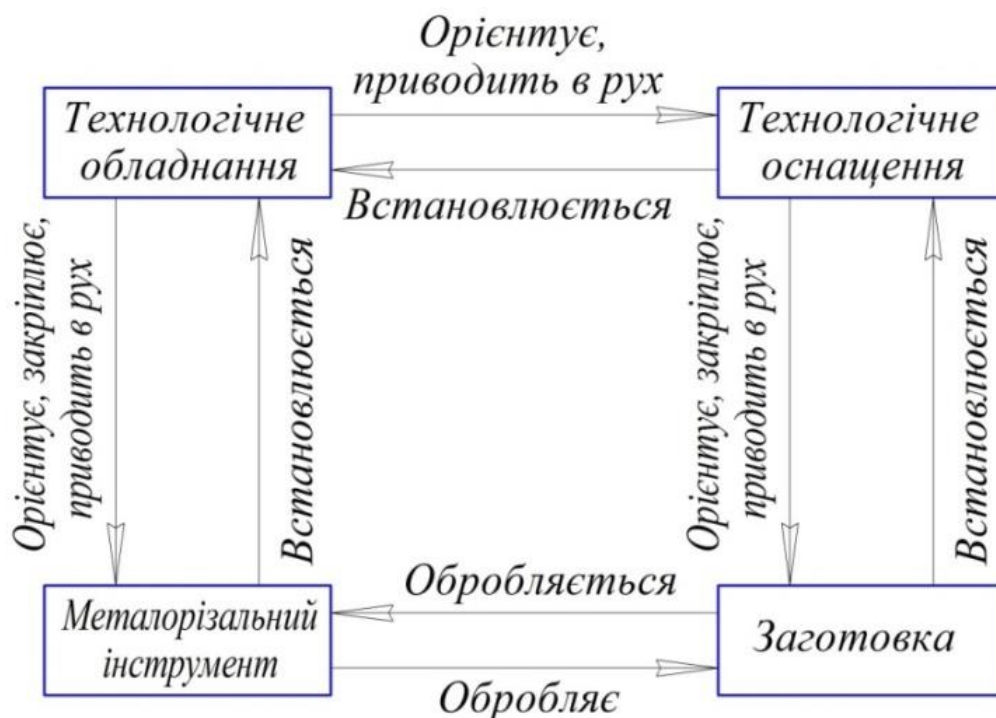


Рис. 1.2. Структура технологічної системи на рівні технологічної операції (технологічна система «верстат - пристрій – інструмент – заготовка»)

Технологічний процес виготовлення виробу тотожний процесу перетворення (успадкокування) та збереження (спадковість) властивостей предмету виробництва під час взаємодій відповідного технологічного середовища із предметом виробництва. Тому, властивості машини визначаються властивостями заготовок деталей і формуючим технологічним середовищем, що є носієм механізму успадковування та перетворення властивостей виробів в процесі їхнього виготовлення [116, 117].

Структурою технологічної системи на рівні технологічної операції є технологічна система «верстат-пристрій-інструмент-деталь (заготовка)» (ВПД(3)). Технологічне середовище при обробленні заготовки формують металорізальний інструмент і верстатний пристрій, а опосередковано – металорізальний верстат [116, 319].

Носії успадкованої інформації – оброблюваний матеріал і поверхня деталі – активно беруть участь в технологічному процесі, проходячи через різні операції та переходи, випробовуючи дії визначальних технологічних факторів [87, 116, 176, 183-185, 188, 190, 200, 202, 204, 319].

Невідповідність точності розмірів і параметрів якості поверхневого шару виконавчих (функціональних) поверхонь виробу умовам його експлуатації спричинює трансформацію отриманих на стадії його розроблення технологічних дефектів у пошкодження та високу ймовірність відмов на стадії експлуатації, що класифікують на три групи (рис. 1.3) [258, 259].



Рис. 1.3. Класифікація відмов, пов'язаних з недосконалістю технологічних процесів [258]

Перша група причин – необґрунтованість технічних умов на виріб – перш за все пов'язана із недоліками роботи конструктора на етапі конструкторської

підготовки виробництва, що закладаються у вироби на етапі технологічної підготовки виробництва (рис. 1.1) та реалізуються при їх виготовленні (рис. 1.3) [116, 258].

Друга група причин, що спричинює відмови з позиції технології, пов'язана з недостатньою надійністю технологічного середовища [116, 117] на певному етапі виготовлення деталей і/або складання машин (рис. 1.3) [258, 259].

На даному етапі розвитку технології машинобудування найменш дослідженою є третя група причин виникнення відмов, пов'язана із залишковими та побічними явищами, що формуються під час виконання технологічного процесу (рис. 1.3) [164, 258]. Усі підгрупи III групи взаємозв'язані між собою: процеси виникнення та формування дефектів під час виготовлення виробів внаслідок явища технологічного успадковування властивостей прогресують та переростають у пошкодження за несприятливих умов експлуатації. Поряд з тим, вплив дефектів мінімізується чи навіть повністю виключається за рахунок раціональної структури технологічного процесу.

З позиції теорії технічних систем, перетворення вхідних у вихідні параметри під час проектування технологічного процесу виготовлення виробу здійснюється за рахунок трансформації множини відправних інформаційних потоків, сформованих відповідно до експлуатаційних характеристик виробу, через множину внутрішніх інформаційних потоків та зв'язків матеріального (М), енергетичного (Е) характеру у множину вихідних інформаційних потоків (І), що забезпечують експлуатаційні характеристики та показники надійності виробу при дотриманні вимог стосовно точності та якості поверхневого шару функціональних поверхонь [124, 125, 166].

Найефективнішим напрямком досліджень технологічного успадковування при виготовленні виробів є поєднання двох напрямків.

Один напрямок досліджень – це розроблення математичних моделей із статистичним опрацюванням результатів із залученням прикладних програмних продуктів для реалізації алгоритмів проектування, із створенням різноманітних моделей структури ТП відповідно до умов експлуатації та застосування різноманітних середовищ/систем для моделювання процесів. Розвиток

інформаційних технологій у машинобудівній галузі сприяє інтенсивному розвитку даного напрямку досліджень.

Інший напрямок – це дослідження фізичної суті процесів, що відбуваються під час виготовлення деталей і складання машин та подальшого генерування ідей з одного напрямку в інший з формуванням єдиного системного підходу до вирішення питання технологічного успадкування [64, 116, 258, 259].

Загальний підхід до технологічного успадкування параметрів якості виробів успішно впроваджений у машинобудівну практику [66, 116, 117, 287, 319]. В зв'язку із складністю аналітичного опису, успадкування властивостей виробів під час їх виготовлення та складання найчастіше описують за допомогою теорії графів [100, 116, 319]. А.М. Дальським [116, 117] запропоновано описувати ТП механічного оброблення виробу, побудованим за принципом ООП, у вигляді графа із представленням вершин як контрольованих параметрів якості після операцій механічного оброблення.

Розгорнутий граф технологічного успадкування властивостей дозволяє відслідковувати перенесення множини функціональних властивостей від вхідної заготовки до вихідної деталі, причому почергове перетворення визначеної властивості відбувається за обґрунтованими технічними вимогами кількості технологічних впливів. Особливістю застосування циклічних графів технологічного успадкування є можливість відгалуження додаткового графа при побудові ТП ремонту виробу із забезпеченням системи ремонтних розмірів [116, 117].

Впровадження принципу ФОП під час виготовлення виробів вимагає створення та розроблення підсистеми технологічного успадкування параметрів якості як складової системи аналізу формоутворення виробу на етапі конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва.

Під час виготовлення деталей машин технологічне успадкування забезпечується комплексом властивостей матеріалу, параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин, що визначає напрямки подальших досліджень:

- технологічне успадкування параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин;

- технологічне успадкуванням властивостей матеріалу виробів;
- об'єднання двох попередніх напрямків досліджень із розробленням комплексних критеріїв оцінки зміни властивостей матеріалу, параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин.

1.1.2. Технологічне успадкування параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності

За результатами сучасних досліджень щодо формування проміжних та вихідних параметрів виробів встановлено, що під час їх 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 [90, 91].

Основний внесок у розвиток теорії механіки пошкодження деталей машин внаслідок деградації їх матеріалу зробили: М. Я. Дзугутов [123], Л. М. Качанов [19, 20], В. Л. Колмогоров [153, 154], В. А. Огородніков [240,241], Ю. М. Работнов [261, 262], Г. О. Смірнов-Аляєв [274], F. Archie [43], J. Besson [10], N. Bonora [11], O. Cazacu [12, 13], D. Corallo [45], M. Dunand [15], W. Johnson [153], J. Lemaitre [41, 42], G. Mirone [45], D. Mohr [15], S. Muenstermann [43], S. Sharaf [43], C. Tasan [58], V. Tvergaard [59-61], T. Wierzbicki [5-8] та багато інших науковців.

Протягом останніх років інтенсивно проводяться дослідження в межах нового етапу розвитку технології машинобудування, пов'язаного із розробленням наукових основ системного проектування технологічних процесів обробки виробів з найефективнішими експлуатаційними властивостями при реалізації принципу ФОП ТП. Наукові досягнення у цьому напрямку висвітлено у роботах В. А. Валєтова [99], В. В. Васильківа [254], Д. В. Василькова [97, 98], Я. В. Васильченко [148, 149], І. Є. Грицяя [56], В. О. Залози [135-139], В. О. Іванова [142], В. Д. Ковальова [148, 149], І. В. Луціва [166], П. М. Мазура [219], О. М. Михайлова [232, 233], О. А. Оргіяна [65], В. А. Пасічника [247], О. А. Пермякова [249], Ю. В. Петракова

[250-253], М. І. Пилипця [254], Л. Я. Роп'яка [52, 53, 62], В. В. Ступницького [56, 57, 279-281], А. Г. Суслова [283-288], В. М. Тонконового [291], Y. Altintas [2], J. P. Davim [1, 14], F. Klocke [21, 22], G. Smith [55], M. Yoshimura [54] та інших.

Значних здобутків у дослідженні технологічного успадковування геометричних і фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару деталей машин, впливу структури технологічних процесів на забезпечення домінантних експлуатаційних характеристик виробів (зносостійкості, втомної міцності, тримкої здатності, корозійної стійкості тощо) досягнули В. Ф. Без'язичний [79-81], Ю. Р. Віттенберг [103], Л. А. Галін [106], А. М. Дальський [116, 117], М. Б. Дьомкін [119-121], С. А. Клименко [100, 101], Б. І. Костецький [158, 159], І. В. Крагельський [160, 161], Я. М. Литвиняк [216, 217], В. І. Марчук [48, 221, 222], А. А. Маталін [225, 226], Н. В. Олійник [244], Е. К. Посвятенко [257], Я. А. Рудзіт [265], А. Г. Суслов [283-289], Я. С. Фельдман [296], Ю. Г. Шнейдер [307, 309], П. І. Ящеріцин [316, 317, 319] 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.

З позиції технологічного успадковування властивостей і відповідно до класифікації [120] макровідхилення профілю відповідають відхиленням першого порядку, хвилястість – другого порядку, шорсткість – третього і четвертого, субмікрошорсткість – п'ятого та шостого, що відображує взаємозв'язки та взаємовпливи у підсистемах різних ієрархічних рівнів технічної системи.

Макровідхилення спричинені похибками неточності виготовлення металорізального верстата та інструмента, пружними деформаціями технологічної системи ВПД(З). Хвилястість формується за рахунок вимушених коливань під час механічного оброблення заготовок із врахуванням впливу технологічного середовища «пристрій – інструмент – верстат» (ПІВ). Формоутворення мікронерівностей визначається кінематичною схемою та способом оброблення поверхонь виробів, фізико-механічних властивостей матеріалу й коливань у

технологічній системі ВПД(З). Субмікрошорсткість в першу чергу визначається структурою оброблюваного матеріалу та його напружено-деформованим станом [130, 131].

У роботах А. Г. Сулова [284, 286] визначено 26 основних параметрів якості мікрорельєфу поверхонь деталей, що впливають на експлуатаційні характеристики, з яких метрологічно забезпечуються лише 16 показників, зокрема Ra , Rz , $Rmax$, Rp , Sm , tp , Wz , $Wmax$, Smw , $Hmax$, $H_{\mu 0}$, h_n , σ_{ocm} , I_{σ} , C_{φ} , I . Забезпечення регламентованих показників якості поверхні здійснюється за допомогою керованих параметрів якості поверхні: Ra , Rz , $Rmax$, Rp , Sm , Wz , $Wmax$, Smw , $Hmax$, $H_{\mu 0}$, h_n , σ_{ocm} .

Забезпечення точності форми та взаємного розташування поверхонь є набагато складнішим, ніж витримання розміру із жорсткими допусками, причому нормування геометричних показників дозволяє керувати параметрами якості у спряженнях машин [116]. Нормовані конструктором параметри шорсткості безпосередньо пов'язані із експлуатаційними характеристиками виробів. Зокрема, середнє арифметичне відхилення профіля Ra , середній крок нерівностей профіля по середній лінії Sm та відносна опорна довжина профіля tm в першу чергу забезпечують зносостійкість деталей спряжень; найбільша висота профіля S – втомну міцність; параметр Rz – регламентовану міцність зчеплення з покриттям [100, 116, 117]. Емпіричні залежності між параметрами основних методів механічного оброблення та якості поверхні виготовлення виробу встановлюють на підставі реалізованого повного чи дробового факторного експерименту [100, 117, 195, 287].

Ефективним інструментарієм технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик машинобудівних виробів є методи поверхневого пластичного деформування (ППД), розробленню та удосконаленню яких присвячено наукові праці І. С. Афтаназіва [70-73, 306], А. П. Бабічева [74], І. В. Гуря [111-113], П. О. Киричка [71], Е. Г. Коновалова [156], І. В. Кудрявцева [163], А. М. Кузнецова [165], А. М. Кука [36, 146, 181], Л. Г. Одинцова [242, 243], Д. Д. Папшева [246], Ю. Г. Проскурякова [260], Е. В. Рижова [266-270], В. М. Смелянського [273], А. Г. Сулова [284, 286], Л. А. Хворостухіна [300], П. А. Чепа [143], Ю. Г. Шнейдера

[308], П. І. Ящерицина [318, 320] та інших науковців. Застосування методів ППД при формоутворенні деталей машин у переважній більшості стосуються принципу ООП ТП, тому потребують подальших досліджень при реалізації принципу ФОП ТП виготовлення машинобудівних виробів.

Запропоновані в дисертаційній роботі дослідження спрямовано на подальший розвиток наукових результатів сформованої у Національному університеті “Львівська політехніка” і НДЛ-40 львівської школи вібраційного оброблення при застосуванні резонансних вібротомарок з дебалансним і електромагнітним приводами для реалізації виробничих процесів [23, 36, 39, 54, 70-73, 92-94, 104, 105, 114, 167, 168, 171, 181, 195, 205-207, 311]. Серйозною проблемою у застосуванні ефективного вібраційного обладнання, спроектованого під великосерійне та масове виробництво продукції, є необхідність його адаптації під вимоги характерного для сучасного машинобудування одиничного і дрібносерійного виробництва.

Встановлено [87, 120], що найважливіші експлуатаційні характеристики деталей і з'єднань (втомна міцність, міцність з'єднання, контактна жорсткість, герметичність з'єднань, міцність посадок, зносостійкість, корозійна стійкість, фреттинг-корозія, теплопровідність) пов'язані із геометричними параметрами якості виконавчих (функціональних) поверхонь виробів.

1. Втомна міцність

Якість поверхневого шару впливає на втомну міцність деталей через коефіцієнт концентрації напружень [283, 286, 289]:

$$\alpha_0 = 1 + \frac{0.2}{tm \cdot Sm} \cdot (2 \cdot \gamma \cdot R_{max} \cdot (R_{max} - R_p))^{0.5}. \quad (1.1)$$

де γ – коефіцієнт, що враховує вплив поверхневих залишкових напружень на міцність деталі:

$$\gamma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma - \sigma_{зал.}}, \quad (1.2)$$

де σ_{-1} – границя міцності матеріалу деталі; $\sigma_{зал.}$ – поверхневі залишкові напруження; σ – напруження від навантаженням.

2. Поверхнева контактна статична та динамічна міцність

В процесі статичного навантаження початок контактних руйнувань визначається його граничним значенням [283, 286, 289]:

$$P_{max} = \frac{1.34 \cdot m \cdot v_0^2}{y_{nl}}, \quad (1.3)$$

де m – маса контактуючої деталі; v_0 – швидкість прикладання навантаження; y_{nl} – пластичні контактні деформації деталі

$$y_{nl} = \pi \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot P \cdot Ra \cdot Wz \cdot H \max}{A \cdot H_{\mu 0}} \right)^{1/3}, \quad (1.4)$$

де P – зусилля; A – геометрична площа контакту.

При дії статичного ($P_{cm.}$) та динамічного ($P_{дин.}$) навантаження контактні руйнування визначаються величиною накопичуваної контактної деформації, яка характеризується параметрами мікрорельєфу поверхні [283, 286, 289]:

$$y_t = \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (P_{cm.} + P_{д.}) \cdot Ra \cdot Wz \cdot H \max}{A \cdot H_{\mu}} \right]^{1/3} \cdot \left(\frac{t}{t_{HB}} \right)^{m_1/3}, \quad (1.5)$$

де t – час дії сил; t_{HB} – час випробування на твердість по Брінелю; m_1 – показник росту деформації при дії динамічного навантаження.

3. Зносостійкість

Інтенсивність зношування деталей спряження визначають [288]:

– для періоду припрацювання

$$I_h = \frac{2.5 \cdot v^{0.5} \cdot Ra^{2/3}}{n \cdot \lambda \cdot (v + 1) \cdot Sm \cdot tm^{2/3}} \left(\frac{P}{k'_1 \cdot \sigma_T} \right)^{7/6} \times \sqrt{15 \cdot \pi \cdot (2 \cdot \pi \cdot Wi \cdot H \max)^{1/3} \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot k'_1 \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E} \right]}, \quad (1.6)$$

– для періоду нормального зношування

$$I = \frac{2.5 \cdot \pi \cdot v^{0.5} \cdot P^{7/6}}{n \cdot \lambda \cdot (v + 1) \cdot tm^{2/3} \cdot (k'_1 \cdot \sigma_T)^{2/3}} \cdot \sqrt{\frac{30 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (2 \cdot \pi \cdot Ra \cdot Wz \cdot H \max)^{1/3}}{E \cdot Sm}}, \quad (1.7)$$

де n – число циклів впливу, яке спричинює руйнування матеріалу; σ_T – границя текучості матеріалу; P – зусилля, що діє по нормалі до поверхонь тертя; W_i –

поточне значення висоти хвилястості; μ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності; ν – параметр початкової ділянки кривої опорної поверхні; k'_1 – поправний коефіцієнт; λ – поправний коефіцієнт:

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_B - \sigma_\tau}{\sigma_a} \right)^{t_y}, \quad (1.8)$$

де σ_B – тимчасовий опір на розрив; σ_τ – поверхневі залишкові напруження; σ_a – діюча величина амплітудного напруження в робочому шарі; t_y – параметр фрикційної втоми під час пружного контакту.

4. Тримка здатність

Встановлено [288], що тримка здатність поверхонь спряжених деталей, їх коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування в умовах тертя ковзання визначається відхиленнями форми та взаємного розташування поверхонь, хвилястістю, шорсткістю та фізико-механічними параметрами якості поверхневого шару. Рівноважний стан поверхневого шару контактуючих деталей, вперше описаний у роботі [289], оцінюють параметром C_x :

$$C_x = \left(R_p^\nu \cdot W_p^2 \cdot H_p^2 \right)^{\frac{1}{\nu+4}} \cdot \frac{k' \left(6 + \frac{1}{\nu+4} \right)}{\rho_m}. \quad (1.9)$$

Також наявність на поверхнях тертя мікровідхилень, зміцнення, залишкових напружень спричинює значні труднощі застосування теорії тертя та зношування, а особливо розрахунків величин зношування та довговічності деталей [284, 286].

Незважаючи на значні досягнення у розробленні математичних моделей стосовно взаємозв'язків технологічних режимів оброблення та параметрів якості поверхні із експлуатаційними характеристиками, підтвердження їх адекватності вимагає у більшості випадків експериментальних досліджень та натурних випробувань, що підвищує працемісткість та собівартість виготовлення машинобудівних виробів. Окрім того, розроблені 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.

1.2. Технологічне забезпечення службового призначення машинобудівних виробів, класифікація їхніх з'єднань і поверхонь

Для сучасного машинобудування ускладнення умов експлуатації (зростання силових навантажень, температур тощо) деталей зокрема і машин загалом при зниженні їх жорсткості (зменшення габаритних розмірів і маси) спричинює підвищення вимог як до точності їхнього функціонування, ефективності роботи (силові характеристики, економічні показники ККД тощо), так і до прогнозування поведінки у визначений період відповідно до життєвого циклу виробу [87, 100, 164, 176, 179, 182, 258, 297, 319]. Згідно ДСТУ 3321:2003 [129] виріб – це будь-який предмет або набір предметів, що їх виробляють на підприємстві, або одиниця промислової продукції, кількість якої обчислюють у штуках (примірниках), зокрема, деталь, складальна одиниця, комплекс, комплект. Виробництво деталей і машин реалізують за допомогою різновидів технічних систем – сукупностей взаємопов'язаних елементів, які перетворюють, зберігають, транспортують або контролюють матеріали, енергію та/або інформацію для конкретних цілей [166].

Проектування процесу виготовлення виробу вимагає вивчення взаємозв'язків і особливостей його експлуатації у технічній системі, що визначається характеристиками об'єкта машинобудівного виробництва: службовим призначенням виробу або технічної системи загалом; способом дії технічної системи або виробу; структурою технічної системи чи виробу; станом технічної системи або виробу [233].

Машинобудівний виріб, в першу чергу, створюється як об'єкт експлуатації для задоволення визначених людських потреб, та об'єкт виробництва, представляючи собою, згідно принципу ФОП ТП, сукупність елементарних взаємопов'язаних підмножин для різних ієрархічних рівнів [75, 231, 232, 280, 281]. Визначена технічна система машинобудівного виробництва забезпечує службове призначення деталей машин відповідно до заданих умов їхньої експлуатації за

дотримання технічних вимог стосовно норм точності, параметрів якості поверхонь та їхнього взаємного розташування на стадії розроблення виробів у їхніх життєвих циклах [157, 239].

Службове призначення машини і її складальних одиниць реалізується відповідно до експлуатаційних вимог визначеними типами з'єднань і виконавчими поверхнями деталей. Дослідженню впливу умов експлуатації на параметри якості та експлуатаційні характеристики різновидів з'єднань і поверхонь деталей машин присвячені роботи В. Ф. Без'язичного [78, 80-81], Б. М. Базрова [75], Б. С. Балакшина [77], В. Ю. Блюменштейна [82, 83], А. М. Ковшова [239], І. М. Колесова [151], А. А. Маталіна [224-226], А. Д. Никифорова [239] та багатьох інших науковців.

Відповідно до експлуатаційних вимог службове призначення виробу або технічної системи розглядають з позиції виконання технічною системою заданої функції мети (формувати, перетворювати, проектувати, виготовляти тощо). У зв'язку з цим під службовим призначенням виробу або технічної системи визначено зовнішню реалізацію функції мети на базі виконання внутрішньої технічної функції [233].

Службове призначення деталі забезпечується функцією мети при виконанні технічних функцій [232, 233] за рахунок сукупності властивостей матеріалу та параметрів якості виконавчих (функціональних) поверхонь, класифікацію яких приведено на рис. 1.4 [75, 77].

При забезпеченні машиною та її складовими елементами (складальними одиницями, деталями) свого службового призначення формується множина причинно-спадкових взаємозв'язків як функцій відклику фізичних процесів і впливів навколишнього середовища [66, 100, 116, 117], що спричинюють еволюцію якісних показників виробу протягом етапів і стадій у його життєвому циклі (рис. 1.1) [258, 259] та формування умов для його фізичного та морального зношування (дод. Б1-Б2) [286, 287, 319-320].

Розроблення технологічних маршрутів оброблення вільних поверхонь і поверхонь нижчих рангів технологічної класифікації поверхонь здійснюють за

принципом ООП ТП, забезпечуючи вимоги конструкторсько-технологічної документації при мінімальній собівартості виготовлення деталей. На противагу оброблення виконавчих поверхонь, що забезпечують виконання виробом його службового призначення, основних і допоміжних баз реалізують згідно принципу ФОП ТП, характерною особливістю якого є технологічне забезпечення найефективніших експлуатаційних характеристик виробу і його показників надійності із дотриманням призначених конструктором параметрів точності та якості поверхневого шару виробу [279-281].

Параметри якості деталей і машин, собівартість і продуктивність виробничого процесу забезпечуються структурою взаємозв'язків і властивостей технологічної системи ВПД(З), які описують фізичний зміст процесів у машині [151]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1.10)$$

де y – параметр службового призначення машини; x_1, x_2, \dots, x_n – параметри зв'язків між виконавчими (функціональними) поверхнями деталей у машині.

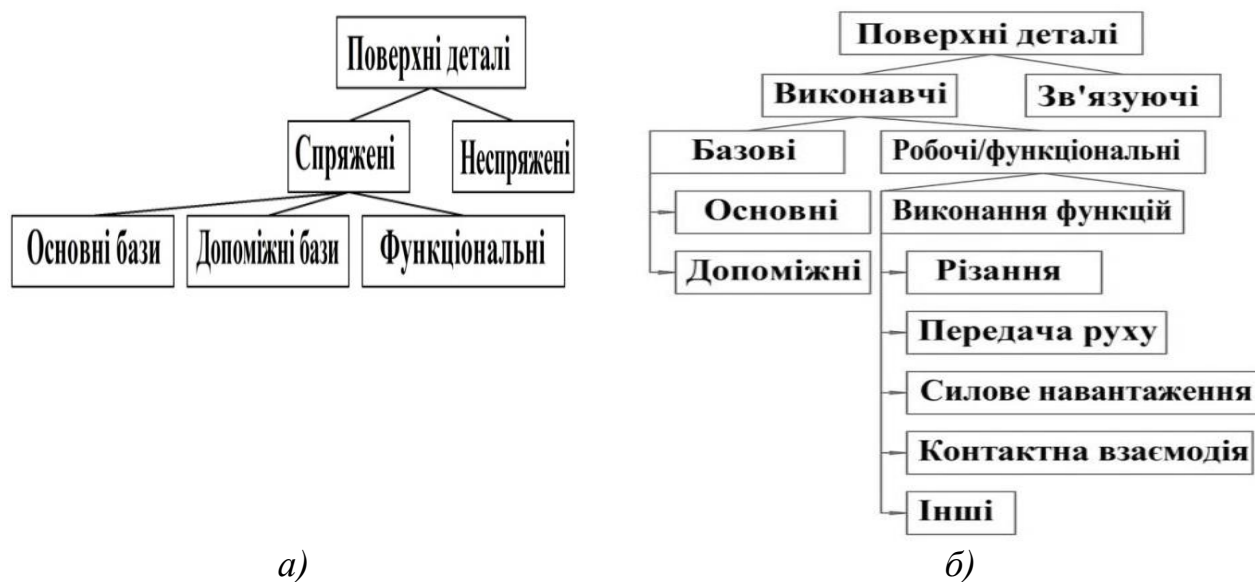


Рис. 1.4. Загальна класифікація поверхонь деталей машин:
за Б. С. Балакшиним *а)* і за Б. М. Базровим *б)*

На етапі конструкторської підготовки виробництва рівняння (1.10) перетворюються у рівняння виду [83, 151]:

$$y = f(\varphi_1(V_1, V_2 \dots V_n), \varphi_2(t_1, t_2 \dots t_m), \dots, \varphi_n(r_1, r_2 \dots r_k)), \quad (1.11)$$

де $\varphi_1(V_1, V_2 \dots V_n)$, $\varphi_2(t_1, t_2 \dots t_m)$, \dots , $\varphi_n(r_1, r_2 \dots r_k)$ – параметри розмірних зв'язків між виконавчими поверхнями машини.

На підставі аналізу стану технічної системи на етапах і стадіях життєвого циклу об'єкту машинобудівного виробництва виріб розглядається у вигляді композиції таких рівнів: виріб – об'єкт експлуатації; об'єкт виготовлення; об'єкт вдосконалення [233].

Розроблення класифікаційних груп машинобудівних виробів скорочує терміни конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (КТПВ) у їхніх життєвих циклах за рахунок застосування економічно-обґрунтованих типових технологічних процесів механічного оброблення, які реалізують принцип ООП ТП.

Основам та удосконаленню класифікації машинобудівних деталей і їхніх елементів присвячено наукові праці А. П. Соколовського [275], С. П. Митрофанова [230, 231], Ф. С. Дем'янюка [122], В. В. Бойцова [88, 89] та інших. У сучасних роботах у даному напрямку наукових досліджень в процесі аналізу великих масивів об'єктів застосовують формальну логіку, теорію множин і розпізнавання об'єктів, кластерний аналіз тощо [245].

Отримання виробів необхідної якості забезпечується багатократним перетворенням конструкторсько-технологічних зв'язків на стадії розроблення деталей машин у їхніх життєвих циклах, їх деталізацією та еволюцією із врахуванням структурних, конструктивних, технологічних та інших спадкових ознак. Застосування альтернативних концепцій технологічного проектування деталей машин визначається умовами їхньої експлуатації. Принципи ФОП ТП в першу чергу реалізують під час виготовлення виробів із виконавчими, спряженими поверхнями, що сприймають в процесі експлуатації підвищені механічні, температурні, триботехнічні навантаження, вплив агресивного середовища або їхнього поєднання. Для виробів, що не відповідають таким експлуатаційним критеріям, з невисокими вимогами до точності та якості поверхневого шару

функціональних поверхонь, економічніше та ефективніше реалізувати принцип ООП ТП.

Для деталей, які містять поєднання виконавчих (функціональних) і вільних (зв'язуючих) поверхонь, подальші теоретико-експериментальні дослідження необхідно спрямувати на проектування прогресивних технологій, що реалізують під час виготовлення об'єкта машинобудівного виробництва і принцип ООП, і принцип ФОП ТП. Такий підхід дозволяє забезпечити і основні вимоги до робочих поверхонь деталей машин, і мінімізувати витрати на виготовлення одиниці продукції.

1.3. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності машинобудівних виробів

1.3.1. Аналіз підходів для забезпечення експлуатаційних характеристик деталей машин

Із підвищенням вимог до експлуатаційних характеристик виробів збільшується кількість технологічних параметрів у ТУ і основних взаємозв'язків між експлуатаційними характеристиками і технологічними параметрами виробів. Труднощі у розробленні засобів і методів випробування деталей і машин призвели до формування самостійної галузі у технологічному забезпеченні експлуатаційних характеристик і надійності виробів [198].

Можливі варіанти технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик деталей машин при механічному обробленні та обробкою тиском приведено на рис. 1.5 [218, 242].

Традиційним є підхід (рис. 1.5), що встановлює безпосередній зв'язок режиму оброблення з експлуатаційними властивостями під час виготовлення деталі (шлях 1-5). Недоліком такого підходу є невідповідність отриманих залежностей для інших виробничих умов, що вимагає повторення трудомістких експериментальних досліджень після зміни номенклатури машинобудівних виробів [218]. Узагальненішим підходом є забезпечення експлуатаційних характеристик машинобудівного виробу при встановленні зв'язку технологічних чинників з

параметрами стану поверхневого шару виробів на першій стадії (шлях 1-3) та подальшому визначенні впливу параметрів поверхні на експлуатаційні характеристики деталей машин на другій стадії (шлях 3-5) (рис. 1.5) [242].

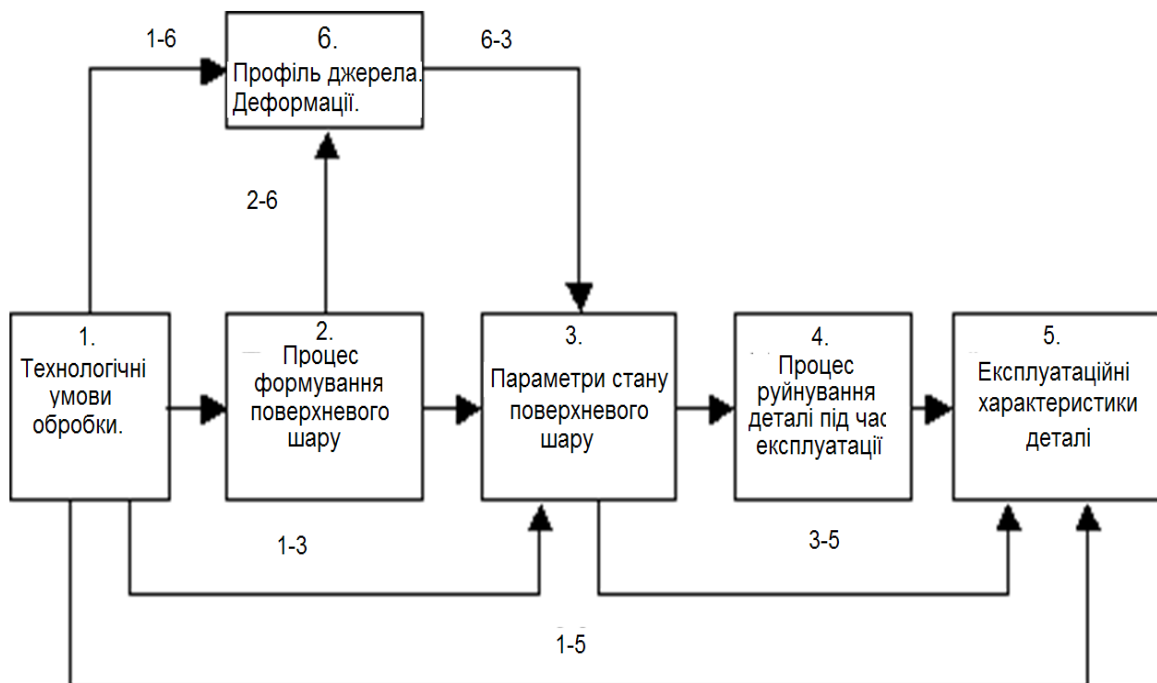


Рис. 1.5. Принципова схема технологічного забезпечення якості поверхневого шару деталей машин [242]

Обидва розглянутих підходи (рис. 1.3) мають основний недолік – емпіричний шлях розв’язку задачі, а відповідно, пов’язані з цим, значну трудомісткість експериментів, обмежене число досліджень параметрів стану поверхневого шару та невисоку точність (в межах точності методу вимірювання) їхнього визначення [218].

Ефективнішим є підхід до технологічного забезпечення експлуатаційних показників деталей (рис. 1.5), який базується на внутрішніх закономірностях процесу формування поверхневого шару у вогнищі деформації (шляхи 1-2 і 2-3). Розкриття таких закономірностей встановлює вплив параметрів стану поверхневого шару на процес руйнування деталі (3-4) і експлуатаційні показники (4-5) [218, 242].

Невирішеною залишається задача забезпечення експлуатаційних характеристик через взаємозв’язки із показниками надійності виробів, незважаючи

на те, що основні показники безвідмовності та довговічності регламентуються у технічних вимогах на виготовлення деталей машин [109, 126-128].

ДСТУ 2860-94 [128] визначає множину показників надійності (безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збережливості) для характеристик параметрів якості машинобудівних виробів та забезпечення їхніх експлуатаційних властивостей. Встановивши дійсні показники надійності елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» і порівнявши їх з регламентованими показниками згідно ДСТУ 2860-94 [164], оцінюють ймовірність забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні згідно технологічного успадковування та принципу проєктування ТП (ООП або ФОП) на визначеному технологічному переході зокрема та технологічній операції і технологічному процесі загалом за умови недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним (ними) інструментом (ами).

У той же час за минуле століття із підвищенням вимог до машинобудівних виробів змінено пріоритети досліджень у теорії надійності технічних систем, що потрібно врахувати у подальших дослідженнях. Найважливіші завдання для конструкторів, інженерів, технологів, науковців визначаються певними вимогами до їхньої міцності, жорсткості, стійкості, ресурсу, системної надійності, безпеки, ризиків і захищеності (табл. 1.1).

Експлуатаційна безпека, на даний час, є найважливішою характеристикою сучасних технічних систем, яка передбачає аналіз відмов і їхніх наслідків. Для кількісних оцінок небезпеки використовується поняття ризику, що трактується як ймовірнісний критерій виникнення небезпек певного класу, або розмір можливих збитків (втрат, шкоди) від небажаної події, чи комбінація цих величин [228].

Зміна пріоритетів вимагає ускладнення як інженерних завдань, так і математичного апарату для їх вирішення та формуванню системності у проведенні досліджень. Поява нової фундаментальної проблеми – забезпечення захищеності об'єктів для запобігання їхніх відмов, аварій, катастроф – визначає нові параметри, критерії, ризики та нормативно-технічні документи, переосмислення відношення до

забезпечення показників надійності та експлуатаційних характеристик виробів [228, 277].

Таблиця 1.1

Еволюція надійності технічних систем

| № з/п | Тривалість | Етапи | Базові вимоги, предмет досліджень | Критерії забезпечення практичного результату |
|-------|-------------|-------|-----------------------------------|--|
| 1. | < 1920–1940 | I | Міцність | Відсутність руйнування |
| 2. | 1940–1960 | II | Жорсткість, стійкість | Збереження форми і розмірів |
| 3. | 1960–1970 | III | Ресурс | Довговічність |
| 4. | 1970–1980 | IV | Надійність | Стійкість до відмови |
| 5. | 1980–1990 | V | Системна надійність | Тріщиностійкість |
| 6. | 1990–2010 | VI | Безпека | Керування безпекою |
| 7. | 2010–2020 | VII | Ризик | Керування ризиками |
| 8. | 2020– | VIII | Захищеність | Забезпечення захищеності |

Типовий для міжнародної теорії та практики підхід до забезпечення надійності системи (рис. 1.6) [9] поєднує конструктивні та аналітичні (кількісні і якісні) методи. Дані методи не взаємозамінюють один одного, а взаємодіють між собою. Із використанням FMEA встановлюють потенційні відмови та приймають заходи для їхнього усунення, зниження впливу або ймовірності їх появи. За допомогою кількісних методів розраховують параметри надійності за критерієм досягнення виробом або його елементами граничного стану [228].

Згідно типового підходу до забезпечення надійності технічних систем (рис. 1.6) [9] для розрахунку показників безвідмовності та довговічності необхідно встановити розподіли відмов елементів, на підставі аналізу та дослідження яких визначається надійність технічної системи загалом. Математичні операції над отриманими розподілами визначають показники надійності системи в рамках

системної (структурної, математичної) теорії надійності. Пріоритетним завданням системної теорії надійності є перехід від показників надійності елементів до показників надійності системи, що не дозволяє вирішувати практичні завдання сучасного машинобудування [228].

Відмінність розрахунку реальної надійності технічної системи з використанням системного підходу полягає у розрахунку надійності елементів і системи в рамках загального багаторівневого імітаційного процесу моделювання із застосуванням фізичних і структурних моделей. Фізичні моделі надійності елементів використовуються на нижчих рівнях, а структурні моделі – на вищих [228, 277].

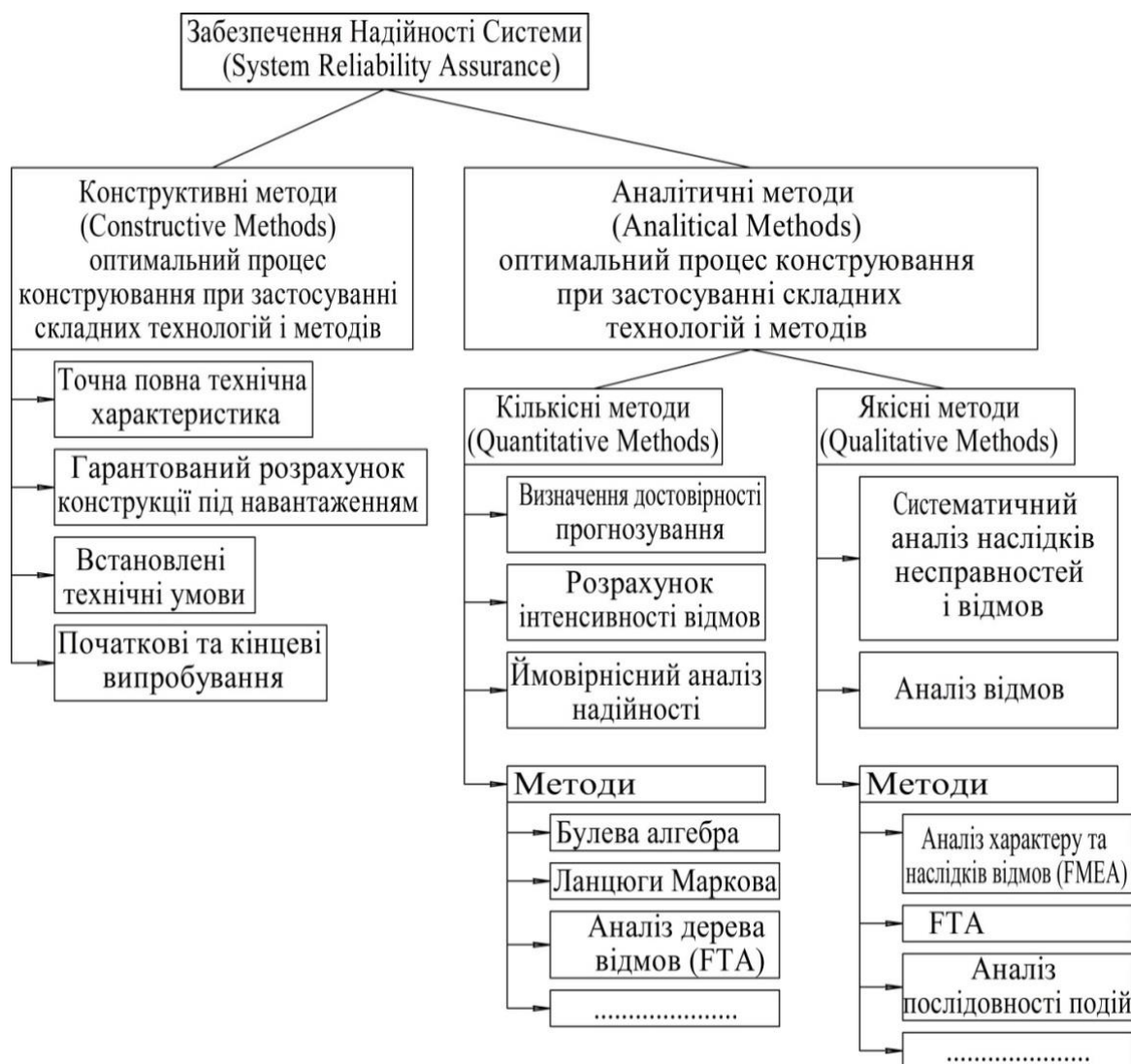


Рис. 1.6. Забезпечення надійності технічної системи [9]

Такий підхід зумовлює аналіз показників надійності у взаємозв'язках із безпекою та ризиком (табл. 1.1), що забезпечують якість технічної системи (рис. 1.7). Поряд з тим прийнята у даний час у більшості країн концепція «прийняттого ризику» (ALARA – as low as risk acceptable) визнає визначений економічний характер забезпечення надійності та безпеки технічних систем при мінімізації ступеня ризику [228].

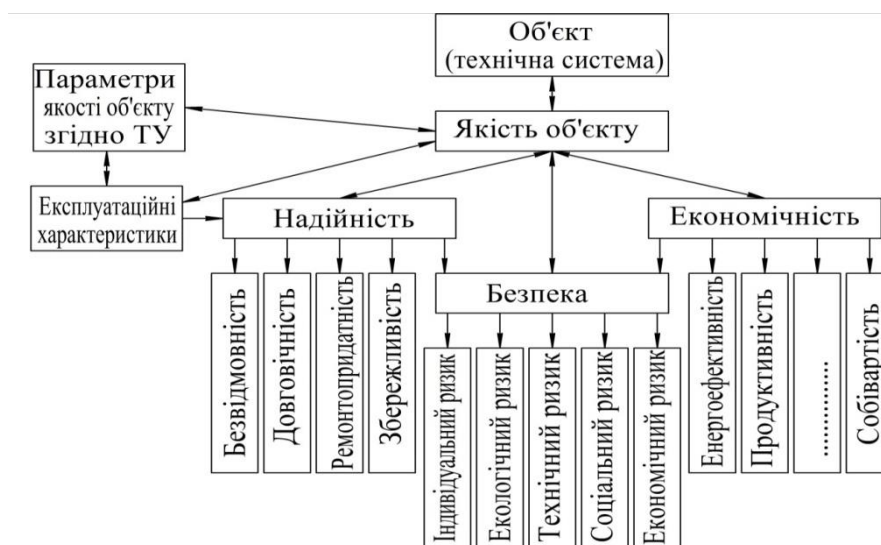


Рис. 1.7. Основні характеристики технічної системи [228]

Теорія надійності технічних систем широко застосовується у розрахунках електричних і електронних схем, що складаються із стандартних компонентів із відомими характеристиками надійності [229, 313]. Однак при аналізі механічних систем, з огляду на велику кількість можливих варіантів конструкції та технології виготовлення, різні умови роботи визначеної деталі у різних машинах і механізмах, показники безвідмовності та довговічності змінюються. Це ускладнює їхнє прогнозування для експлуатаційних умов [76, 228].

Крім того, для електричних і електронних схем розглядають системи із незалежною поведінкою елементів, що описуються основною залежністю теорії надійності [84, 313, 314]:

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t). \quad (1.12)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи технічної системи; $P_i(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -тої підсистеми (елемента); N – загальна кількість підсистем (елементів).

На противагу елементи реальної механічної системи, згідно принципу ресурсно-залежної поведінки, є взаємозалежними, їхні відмови/граничні стани пов'язані один з одним і визначаються впливом загальних факторів. Тому застосовувати формулу у вигляді (1.3) для механічних систем недоцільно через кінцеві некоректні результати обчислень [228].

Встановлено [228, 277, 313], що сучасні підходи до розрахунку показників надійності технічних систем базуються на застосуванні поняття граничного стану елемента системи, при досягненні якого подальша його експлуатація неможлива або недоцільна.

1.3.2. Структура інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки машинобудівного виробництва

На даний час розроблення та впровадження у практику машинобудівних підприємств інтегрованих інформаційних систем керування технологічними процесами виготовлення виробів є головним рушієм економічного зростання промислово розвинених країн світу [87].

Встановлено, що близько 80 % технологічних дефектів, які виявлено під час виробництва деталей машин, характеризуються недостатньою якістю процесів розроблення концепції виробу та підготовки його виробництва. Причиною близько 60 % усіх відмов, що виникають під час гарантійного терміну виробу, є помилкове, поспішне та незавершене розроблення, а також недотримання технічних умов (ТУ) [164, 176, 182]. Це стосується, в першу чергу, традиційних технологічних процесів, що реалізують принципи ООП, із обмеженістю вхідних даних (лише регламентовані параметри якості виробів без взаємозв'язків із експлуатаційними характеристиками та показниками надійності).

У традиційних автоматизованих системах технологічної підготовки машинобудівного виробництва реалізується об'єктно-орієнтований принцип

проектування технологічних процесів, що передбачає покрокове виконання взаємопов'язаних етапів на основі алгоритму прототипування. Основним завданням при цьому є забезпечення параметрів якості продукції на стадії створення виробу його життєвого циклу за рахунок лише досягнення необхідних вимог конструкторської документації. У цьому випадку критерієм оптимізації при виборі раціонального варіанту технологічного процесу слугує, як правило, мінімальна технологічна собівартість виготовлення виробу при максимальній продуктивності та близьким до нормативного фактичним коефіцієнтом завантаження основного технологічного обладнання без функціонального аналізу експлуатаційних характеристик виробу, покладаючись на досвід, кваліфікацію та технічну грамотність конструктора [233, 279].

Принцип ООП при виготовленні машинобудівних виробів ефективно реалізується для вільних (зв'язуючих) поверхонь (рис. 1.4) і поверхонь нижчих рангів технологічної класифікації поверхонь.

Оброблення виконавчих поверхонь, що забезпечують виконання виробом його службового призначення, основних і допоміжних баз (рис. 1.4) доцільно реалізовувати згідно принципу ФОП ТП, основне завдання якого полягає у технологічному забезпеченні експлуатаційних характеристик виробу відповідно до робочих навантажень із дотриманням регламентованих параметрів точності та якості поверхневого шару виробу [189, 200].

Розроблення технологій виготовлення виробів та їх реалізація підпорядковуються загальним принципам теорії технічних систем [166].

Згідно Берталанфі [124, 238], об'єкт розглядають як систему, якщо він складається із підсистем (поділяється на частини), що формують єдине ціле із новими властивостями із математичним описом взаємозв'язків елементів у системі, і є підсистемою більшої системи. У такому випадку для дослідження об'єкта використовують основні закони теорії технічних систем.

Згідно досліджень [232, 233, 279-281] машинобудівний виріб при реалізації принципу ФОП ТП представлено як технічну систему, що складається із множини підсистем, елементи якої формують множину взаємозв'язків із підсистемами

виробничого процесу та його структурних елементів (рис. 1.8). «Глибину» досліджень визначають поставлені завдання на етапах і стадіях життєвого циклу машинобудівного виробу.

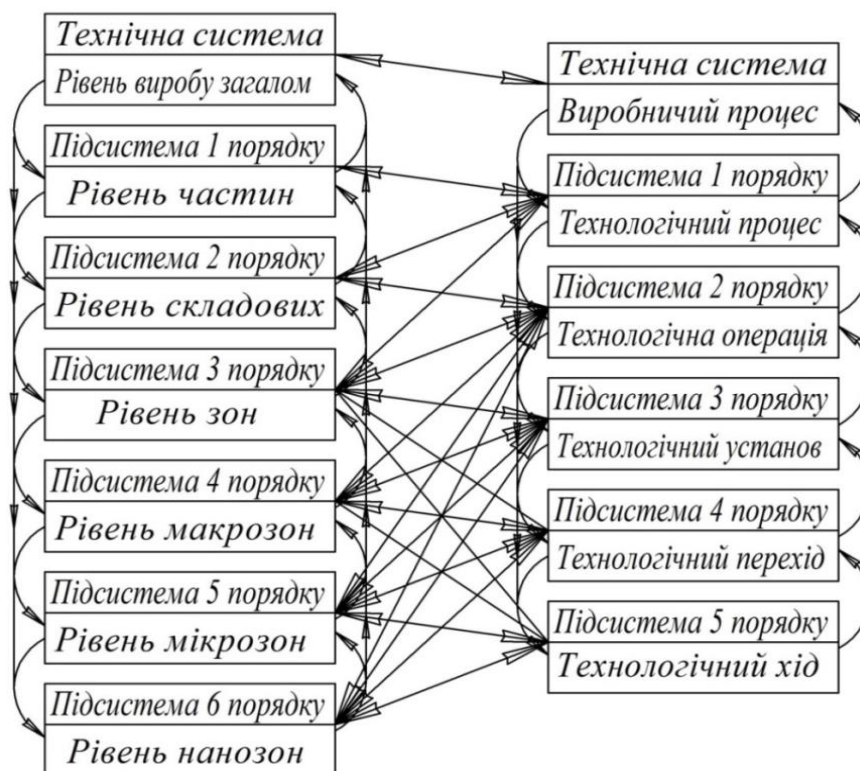


Рис. 1.8. Формування підсистем різних ієрархічних рівнів згідно теорії технічних систем для функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів

У загальному випадку згідно принципів ФОП ТП виріб як технічна система формується у вигляді інженерної піраміди із сукупності підсистем різних ієрархічних рівнів (рис. 1.8) [232, 233]: рівня машини (кінцевого елементу задоволення суспільної потреби); рівня частин машини (складальних одиниць); рівень деталей машини; рівень робочих зон деталі; рівня макрозон в робочих зонах (макроскопічний рівень досліджень); рівня мікрозон (мікроскопічний рівень досліджень); рівня нанозон (субмікроскопічний/наноскопічний рівень досліджень). Поряд з тим виробничий процес як технічна система формується підсистемами 1-5

порядку. Будь-яка підсистема є технічною системою по відношенню до підсистеми нижчого рівня, що підпорядковується загальним принципам теорії систем (рис. 1.8).

Стосовно життєвого циклу виробу стадії його розроблення та експлуатації (рис. 1.1) є підсистемами I порядку. У свою чергу підсистеми I порядку складаються із підсистем II порядку, зокрема стадія розроблення виробу включає підсистеми конструкторсько-технологічної підготовки виробництва та виробництва продукції, а стадія експлуатації: використання за призначенням виробу та його списання (утилізацію, знищення) (рис. 1.9).

Технічну систему для принципів ООП і ФОП технологічного процесу механічного оброблення виробу представлено у вигляді двох підсистем: конструкторсько-технологічної підготовки та виробництва виробу (рис. 1.9, 1.10).

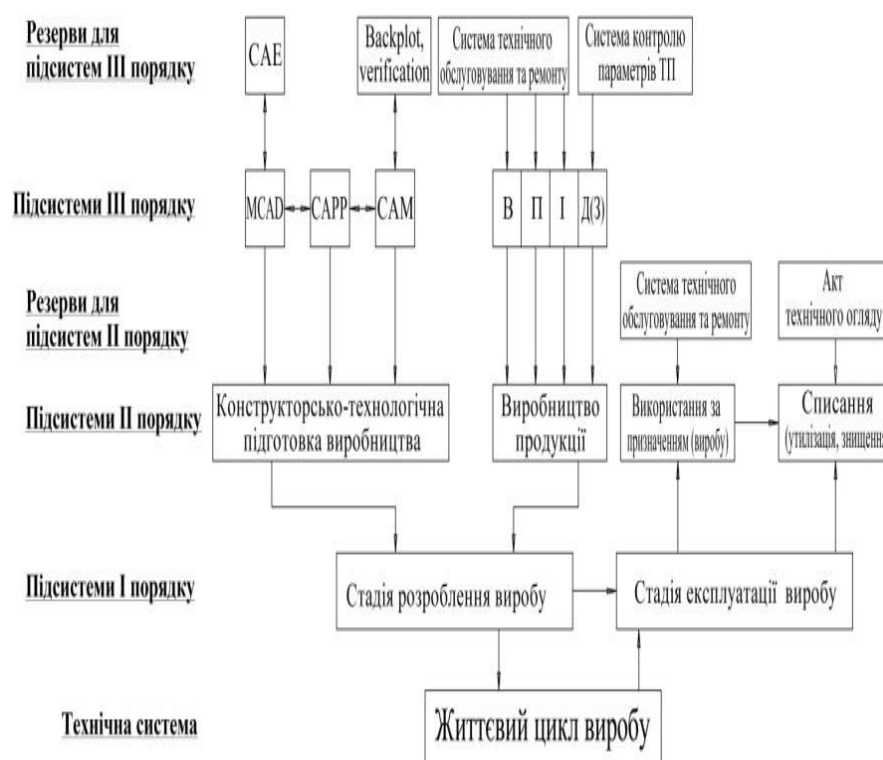


Рис. 1.9. Принципова схема технічної системи для реалізації принципу ООП ТП виготовлення деталей машин

Розроблення технологій згідно принципу ООП передбачає послідовне виконання взаємопов'язаних етапів КТПВ (рис. 1.9). За допомогою системи конструкторського проектування машинобудівних виробів (CAD/MCAD –

(Mechanical) Computer-Aided Design – автоматизоване проєктування механічних пристроїв і їх елементів) формується цифровий макет виробу в процесі використання програмних продуктів NX (Unigraphics), ProEngineer, SolidWorks, AutoCAD тощо. За допомогою автоматизованих систем інженерних розрахунків (CAE – Computer Aided Engineering) моделюються силові, кінематичні, динамічні, термічні тощо умови експлуатації та перевіряється вибір конструктивних параметрів та матеріалу проєктованих деталей машин за допомогою Ansys, MATLAB, Solid Edge, Fusion 360 тощо. Системами технологічного проєктування (CAPP – Computer Aided Process Planning) забезпечується можливість багатоваріантного проєктування технологічних процесів в автоматичному або інтерактивному режимі із можливістю автоматизованого програмування для верстатів з ЧПК (CAM – Computer Aided Manufacturing). Відомими CAPP-системами є TECHCARD, ВЕРТИКАЛЬ, АДЕМ, СПРУТ-ТП, ТехноПро тощо [280, 281] (рис. 1.9).

Стадія розроблення виробу забезпечується технологічною системою ВПД(З): (рис. 1.9), при цьому залежність експлуатаційних характеристик, від параметрів якості поверхні з одного боку та залежність параметрів якості від умов обробки (методи оброблення, режими тощо) обумовлюють вирішення двох типів завдань [236]:

- 1) конструкторське забезпечення вихідних параметрів виробів і їхніх експлуатаційних характеристик;
- 2) технологічне забезпечення регламентованих конструктором параметрів точності та якості поверхневого шару для вільних (зв'язуючих), неспряжених поверхонь (принцип ООП ТП) і забезпечення експлуатаційних характеристик виробів при регламентованих параметрах їхньої якості для виконавчих (функціональних), спряжених поверхонь (принцип ФОП ТП).

Діагностування поточних параметрів технічної системи та перевірка їхньої відповідності регламентованим ТУ значенням забезпечується «резервами» для підсистем n-го порядку. Однак на відміну від загальноприйнятого поняття резерва як засобу повноцінної заміни основного елемента (ланки) технічного об'єкту у разі його відмови (виходу з ладу), в умовах застосування принципу ФОП ТП він

визначає також засоби діагностування (контролю) параметрів якості виробів залежно від функціонального призначення поверхні (виконавча/спряжена чи вільна/неспряжена) для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності [233].

Резерви [109] слугують для забезпечення надійності об'єкта за рахунок використання додаткових засобів і / або можливостей понад мінімально необхідних для виконання необхідних функцій. Резерви аналізуються за допомогою теорії інформації при позбавленні їх ступеней вільності. Після визначення змінних резервів визначаються «нестійкі» моди системи – параметри порядку [298].

Функції контролю для етапів і стадій життєвого циклу виробу виконують системи технічного обслуговування та ремонту, контрольні операції у структурі ТП, технологічні процеси технічного контролю виробів, натурні випробування, що проводять після виготовлення деталей і складання машини [258, 259].

Резерви для стадії розроблення виробу для принципу ООП ТП приведено на рис. 1.9.

Для принципу ООП ТП на етапі виробництва для складників системи ВПД(З): технологічного обладнання (металорізальних верстатів), технологічного оснащення (верстатних пристроїв), металорізального інструменту резервами служить система профілактичного технічного обслуговування та ремонту. Післяопераційний контроль, окремий ТП технічного контролю виробу, експлуатаційні випробування застосовують залежно від поставлених технічних вимог щодо забезпечення параметрів якості, експлуатаційних характеристик та показників надійності (рис. 1.9).

На етапі КТПВ (підсистеми II порядку) за допомогою алгоритму прототипування у САД-системі розробляється 3D/2D модель виробу із обмеженнями по таких параметрах: геометрична точність, шорсткість і стан поверхневого шару виконавчих і спряжених поверхонь, матеріал. На підставі 3D/2D моделі виробу за допомогою інструментарію визначеної системи САЕ підтримки інженерних розрахунків, як резерву системи MCAD, аналізуються параметри виробу

відповідно до силових умов його функціонування, кінематичних, динамічних, термічних і метеорологічних умов його експлуатації тощо [56, 57].

В результаті взаємозв'язків CAD/CAE систем формуються моделі втомної міцності, забезпечення триботехнічних характеристик виконавчих і спряжених поверхонь деталі, корозійної стійкості, тримкої здатності тощо [280, 281]. За отриманими результатами та алгоритмом прототипування розробляється раціональний технологічний процес за критерієм мінімальної собівартості.

При використанні верстатів з ЧПК розробляється керуюча програма у САМ-системі. Резервами для САМ-системи служать перевірки керуючої програми за допомогою графічного відтворення траєкторії руху центру інструмента або повної імітації механічної обробки на верстаті з демонстрацією процесу видалення матеріалу. Перший вид перевірки (Backplot) дозволяє виявити помилку, яку важко помітити при звичайному перегляді коду керуючої програми. Другий – Verification – на відміну від Backplot демонструє процес видалення матеріалу заготовки і дозволяє побачити повний результат роботи керуючої програми у вигляді оброблених поверхонь деталі [141]. Для стадії експлуатації деталей машин резервами для етапу використання слугують організована система технічного обслуговування та ремонту, а для етапу списання – акт технічного огляду (рис. 1.9).

При ускладненні конструкцій машин забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності їх деталей вимагає системного підходу, нових концепцій та ідей, що на сучасному етапі розвитку машинобудування реалізується впровадженням концепцій PLM (Product Lifecycle Management – керування життєвим циклом виробу) із проектуванням прогресивних технологій машинобудівного виробництва засобами паралельного інжинірингу – CAPE (Concurrent Art-to-Product Environment).

Принцип паралельного інжинірингу узгоджує виконання процесів конструкторсько-технологічного розроблення та проектування одночасно з моделюванням процесів їхнього виготовлення на стадії розроблення об'єктів машинобудівного виробництва і прогнозуванням поведінки на стадії їхньої експлуатації у життєвих циклах (рис. 1.1). На етапі конструкторсько-технологічного

проєктування при паралельному інжинірингу виявляють недоліки та проблеми, характерні для пізніших етапів і стадій у життєвому циклі виробу (рис. 1.1). Це дозволяє оптимізувати витрати, підвищити якість деталей машин та зменшити терміни їхнього виведення на ринок [279, 281]. Відмінностями паралельного інжинірингу від традиційного підходу до організації виробничих процесів є розроблення та узгодження конструкторсько-технологічних напрацювань у багатопрофільних робочих групах із ліквідацією традиційних перешкод між функціями окремих фахівців; ітеративність та рекурентність процесу наближення до необхідного результату [233].

Концепція PLM передбачає чітке планування, прогнозування, узгодження робіт, їхню реалізацію та вдосконалення на етапах КТПВ та виробництва на стадії розроблення виробу та на стадії його експлуатації у життєвому циклі, що передбачає [95, 140, технчна система

279]: «оцифрування» конструкторської та технологічної документації; «оцифрування» експлуатаційної та ремонтної документації у зручному для користувача вигляді з можливістю дистанційного замовлення запасних частин і матеріалів; організація та впровадження інтегрованої логістичної підтримки виробів на стадії їх експлуатації у життєвих циклах; наявність і функціонування електронної системи каталогізації продукції; наявність на підприємствах систем менеджменту якості, що відповідають вимогам стандартів ISO 9000:2000 тощо.

Для реалізації методології PLM в машинобудуванні на основі принципу паралельного проєктування при застосування принципу ФОП є використання автоматизованої системи аналізу формоутворення виробу або САФ-системи (Computer Aided Forming) (рис. 1.10).

САФ-система є резервом для САРР-системи (рис. 1.10). Робота САФ-системи визначається аналізом реологічної імітаційної моделі окремих технологічних переходів і комплексом функціональних модулів і аналітичних додатків формування точнісних, термодформаційних, мікрогеометричних і структурно-фазових параметрів оброблюваних поверхонь. Виходячи з предиктивних можливостей САФ-системи, реалізується алгоритм розроблення раціональної

структури технологічного процесу виготовлення виробу для прогнозування його експлуатаційних характеристик [57, 279-281].

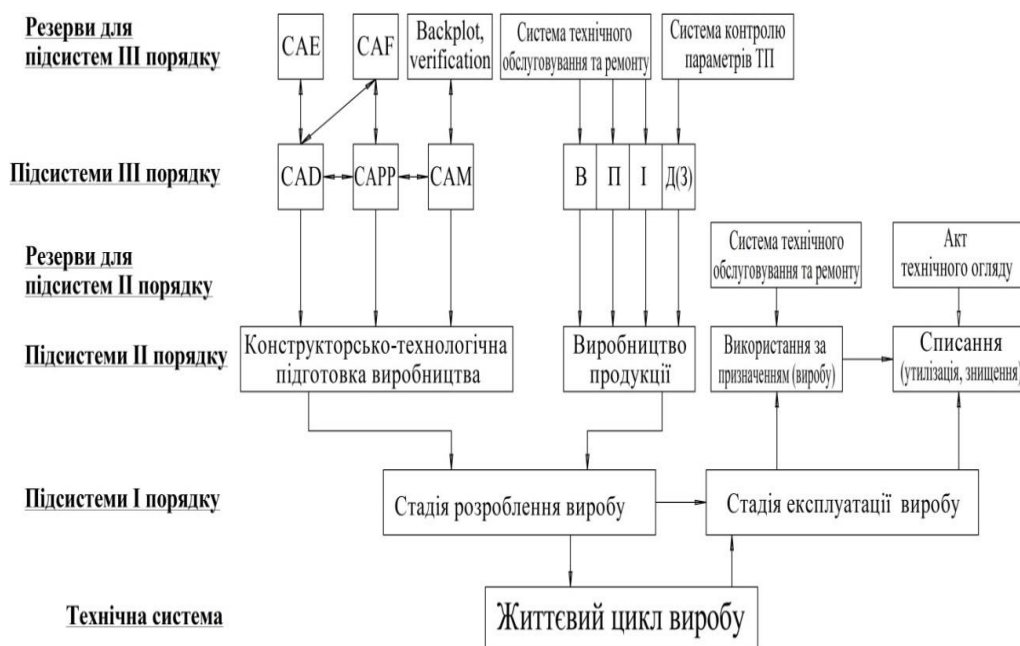


Рис. 1.10. Принципова схема технічної системи для реалізації принципу ФОП проектування технологічних процесів виготовлення деталей машин

Автоматизована система аналізу формоутворення виробу (CAF-система) є важливим елементом інтегрованої системи КТПВ, що реалізує принципи ФОП ТП. Вона містить підсистеми формоутворення різанням (CAF-C (Computer Aided Forming – Cutting)), пластичною деформацією (CAF-P (Computer Aided Forming – Plastic deformation)), формування поверхневого шару (CAF-S (Computer Aided Forming – Surface)) та формоутворення методами складання (CAF-A (Computer Aided Forming – Assembly)). Поряд з тим підсистема аналізу формоутворення виробу методом пластичного деформування поділяється на підсистеми об'ємного пластичного деформування (CAF-VPD (Computer Aided Forming – Volumetric Plastic Deformation)) і поверхневого пластичного деформування (CAF-SPD (Computer Aided Forming – Surface Plastic Deformation)), а підсистема аналізу формоутворення поверхневого шару виробу – на підсистеми нанесення поверхневих покриттів (CAF-SC (Computer Aided Forming – Surface Coating)) і поверхневого термічного оброблення (CAF-SHT (Computer Aided Forming – Surface Heat Treatment)) [279].

Поряд з тим реалізація САФ-системи для сучасного машинобудівного виробництва вимагає використання великої кількості опрацьованих даних на підставі проведених теоретичних досліджень і реологічного імітаційного моделювання, що вимагає підтвердження експериментальних досліджень. Вирішення цього завдання можливе при використанні інтегрованих у САФ-систему баз даних (БД) / баз знань (БЗ) або виконуючу функції БД/БЗ допоміжної системи, що є складовим елементом автоматизованої системи аналізу формоутворення виробу (САФ-системи) при розробленні PSPAS-системи (Product Shaping/Processing Analysis System – системи аналізу формоутворення виробу)). Окрім того, в деяких випадках допоміжна система аналізу формоутворення виробу PSPAS-система замінює САФ-систему при виготовленні деталей машин для умов одиничного та дрібносерійного виробництва. У структурі PSPAS-системи передбачається підсистема технологічного успадковування параметрів його якості, яка характеризує та забезпечує роботу усіх інших підсистем при обробленні різанням, пластичному деформуванні, нанесенні покриттів, термообробленні та складанні.

Впровадження принципу ФОП ТП у машинобудівне виробництво пов'язано із розвитком комбінованих і гібридних технологій [232, 233].

Комбінований технологічний процес – це процес послідовної реалізації не менше двох різних варіантів простих методів технологічних впливів і/або комбінованих методів оброблення виробів, призначений для перетворення початкових властивостей виробів у кінцеві і забезпечення заданих показників їх якості. Гібридний технологічний процес – процес послідовної реалізації гібридних методів оброблення виробів. Гібридний метод оброблення – поєднання не менше двох одночасно діючих різних типів технологічних впливів матеріального, енергетичного та інформаційного характеру, що підсилює дію кожного з них і виконується новими методами при взаємному впливі один на одного, які дозволяють забезпечувати якісно нову сукупність властивостей і міру корисності виробів машинобудування при формуванні властивостей виробів нетрадиційними принципами [232, 233].

Комбіновані та гібридні методи оброблення виробів завдяки комплексній сумісній дії різних видів технологічних впливів забезпечують визначені властивості матеріалу виробу та компактування його структури із необхідними властивостями та параметрами [232, 233, 279].

Проте у традиційній САФ-системі [279] є відсутніми підсистеми, що описують характерні для принципу ФОП ТП комбіновані та гібридні технології. Це зумовлює потребу у розробленні підсистеми для аналізу комбінованих та гібридних технологій у PSPAS-системі, що виконує функції БД/БЗ САФ-системи, або використовується самостійно (незалежно) у структурі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

1.4. Характеристика основних критеріїв для принципів об'єктно- і функціонально-орієнтованого проєктування технологічних процесів під час виготовлення машинобудівних виробів

У дослідженнях [279] встановлено основні критерії оцінки принципів ООП і ФОП, зокрема комплексний аналіз вхідних даних; раціональний вибір структури ТП; область ефективного застосування розроблюваної технології.

В роботах [232, 233, 279-281] відзначається, що загальна методологія синтезу ТП при використанні принципу ФОП виготовлення машинобудівних виробів ґрунтується на розроблених нових принципах. Загальна методологія синтезу функціонально-орієнтованих технологій виготовлення машинобудівних виробів зумовлена реалізацією множини різних за якістю та функціональними властивостями технологічних впливів, загальна структура і параметри кожного з яких забезпечуються відповідно до функціональних особливостей експлуатації окремих елементів модуля виробу в машині.

Порівняльний аналіз принципів ООП і ФОП за комплексним аналізом вхідних даних приведено у табл. 1.2, за принципом побудови та критеріями оптимізації технологічних процесів – у табл. 1.3, за областю ефективного застосування розроблюваної технології – у табл. 1.4 на підставі аналізу [279-281].

Таблиця 1.2

Порівняльний аналіз принципів ООП і ФОП за комплексним аналізом
відправних даних

| Принцип об'єктно-орієнтованого проєктування технологічного процесу | | Принцип функціонально-орієнтованого проєктування технологічного процесу | |
|--|--|---|---|
| Вхідні дані для проєктування | Джерела надходження відправної інформації | Вхідні дані для проєктування | Джерела надходження відправної інформації |
| Матеріал деталі | Проектно-конструкторська документація, система CAD, система MacroCAE | Інформаційне забезпечення матеріалу деталі із кодуванням найважливіших відправних параметрів і характеристик | Спеціалізована база даних |
| Робоче креслення деталі відповідно до вимог ЄСКД | | Геометрична форма визначеної функціональної поверхні деталі | Проектно-конструкторська документація, система CAD |
| Геометрична точність функціональних поверхонь | | Мікротопологія поверхневого шару визначеної функціональної поверхні деталі | Проектно-конструкторська документація, система CAF, система CAPP, комплексна система CAE: MacroCAE, MicroCAE, NanoCAE |
| Геометричні параметри якості поверхневого шару виробу | | Фізико-механічні параметри якості визначеної функціональної поверхні деталі | |
| Тип і форма організації виробництва | | Проектно-конструкторська документація, програма випуску виробів, режим роботи, дійсний річний фонд часу роботи обладнання | функціональної поверхні деталі поверхні (наклеп, напружено-деформований стан, залишкові напруження) |

Для принципу ООП в процесі виготовлення машинобудівних виробів основними відправними даними (табл. 1.2) є проектно-конструкторська документація, розроблена та оформлена за допомогою САД-системи. Інформація стосовно властивостей матеріалу, точності та якості поверхневого шару функціональних поверхонь обмежується, як правило, вимогами ЄСКД і технічними вимогами до складальних креслень машини, її складальних одиниць і робочих креслень деталей. У даному випадку технолог не має можливості функціонально аналізувати експлуатаційні характеристики виробу, а відповідальність за якість формування відправних даних для КТПВ покладається на досвід та виоку кваліфікацію конструктора (табл. 1.2).

На відміну від принципу ООП принцип ФОП ТП реалізується за зовсім протилежним принципом (табл. 1.2). Здійснюється комплексний аналіз матеріалу машинобудівного виробу, норм точності та параметрів якості його виконавчих поверхонь з позиції забезпечення експлуатаційних характеристик із вибором раціональних вхідних даних. При цьому вхідні дані адаптовуються у технологічний ланцюжок «вхідна заготовка – кінцева деталь» при технологічному успадкуванні параметрів якості виробу з можливістю прогнозування основних його параметрів у визначений період на основних етапах життєвого циклу.

Основною перевагою принципу ООП для прийняття раціонального технологічного рішення (табл. 1.3) є відпрацьована алгоритмічна побудова технологічного проектування у взаємозв'язку із спеціалізованою теоретичною базою знань. Для принципу ООП метод аналізу застосовують для розроблення технологічного процесу, який базується на адаптуванні типового ТП для даного класу виробів до конкретних технічних вимог. Критерієм оптимізації параметрів ТП служить мінімальна собівартість виготовлення виробу за умови максимальної продуктивності праці, високого ступеня автоматизації виробничого процесу, зменшення працемісткості на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва та максимально-обгрунтованому завантаженні основного технологічного обладнання із забезпеченням вимог конструкторсько-технологічної документації.

Таблиця 1.3

Порівняльний аналіз принципів ООП і ФОП за принципом побудови та критеріями оптимізації технологічних процесів

| Принцип об'єктно-орієнтованого проєктування технологічного процесу | | Принцип функціонально-орієнтованого проєктування технологічного процесу | |
|--|--|---|--|
| Принцип побудови структури ТП | Критерії оптимізації параметрів ТП | Принцип побудови структури ТП | Критерії оптимізації параметрів ТП |
| Метод аналізу: раціональний вибір за допомогою алгоритмічного пошуку типового або адаптованого стосовно конструкторська - технологічних ознак і відправних даних для проєктування ТП | Технологічне забезпечення мінімальної собівартості виготовлення виробу при максимально-можливій продуктивності праці та максимально-обгрунтованому завантаженні технологічного обладнання із дотриманням параметрів якості об'єкту виробництва, обумовлених в нормативній документації | Метод синтезу: алгоритмічний синтез раціональної структури операцій та оптимального поєднання технологічних переходів, що базується на прогнозованих результатах імітаційно-реологічного моделювання напруженого деформованого стану виробу в процесі його формоутворення | Технологічне забезпечення заданих експлуатаційних характеристик виробів із дотриманням призначених параметрів точності та якості поверхневих шарів визначених функціональних поверхонь |

Таблиця 1.4

Порівняльний аналіз принципів ООП і ФОП за областю ефективного застосування розроблюваної технології

| Принцип об'єктно-орієнтованого проектування технологічного процесу | | Принцип функціонально-орієнтованого проектування технологічного процесу | |
|--|---|--|--|
| Переваги | Недоліки | Переваги | Недоліки |
| Простота представлення та аналізу відправної інформації | Неможливість обґрунтування вибору параметрів якості виробу відповідно до реальних експлуатаційних умов | Технологічне забезпечення раціонального комплексу функціональних кваліметричних показників виробу на підставі формалізації рекурентних зв'язків як результат аналізу технологічних рішень із врахуванням реальних експлуатаційних умов. | Відносна складність представлення та аналізу відправної інформації |
| Комплексні ґрунтова база даних і база знань для забезпечення, прийняття та реалізації раціонального технологічного рішення | Відсутність зворотніх зв'язків технологічної підготовки виробництва із іншими етапами стадії створення та стадії експлуатації життєвого циклу виробу | | Складність врахування макрогеометричних параметрів деталі для формування раціональної структури технологічного процесу |
| Застосування класичного алгоритму прийняття технологічних рішень | Неможливість реалізації принципу паралельного інжинірингу | Повна відповідність концепції PLS/PLM (Product Life Cycle Support – забезпечення життєвого циклу виробу (ЖЦВ)/ Product Life Cycle Managment – керування ЖЦВ | Узгодженість інформаційно-цифрового забезпечення CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM систем |
| ґрунтова конструкторсь ко-технологічна підтримка засобами CAPP і CAE-систем | Складність комплексної реалізації концепції PLS/PLM (Product Life Cycle Support – забезпечення життєвого циклу виробу (ЖЦВ)/ Product Life Cycle Managment – керування ЖЦВ | Забезпечення системної інтеграції автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва (CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM) засобами паралельного інжинірингу Створення база даних і бази знань на підставі досліджень технологічного успадкування з метою вдосконалення існуючої CAE-системи (MicroCAE, Nano-CAE) | Необхідність впровадження CAF системи – автоматизованої технологічної системи формоутворення виробу |

Однак неврахування функціональних властивостей виробу у його подальшій експлуатації перешкоджає розвитку концепції PLS/PLM для принципу ООП. Через відсутність рекурентних та ітераційних взаємозв'язків із іншими етапами інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки виробництва реалізації принципу паралельного інжинірингу неможлива. Технологічне забезпечення формоутворення виробу імітаційно-реологічним моделюванням та іншими методами досліджень не реалізується. Зміна характеристик матеріалу деталі при аналізі технологічного успадкування її властивостей не враховується.

На відміну від принципу ООП при ФОП пріоритетним для вибору раціональної структури ТП є метод синтезу (табл. 1.3, рис. 1.10). Основними етапами синтезу при застосуванні принципу ФОП ТП передбачається: аналіз експлуатаційних особливостей виробу та побудова структури функцій; поділ виробу на функціональні елементи за рівнем «глибини технології» та їхня класифікація; формування маршрутів оброблення поверхонь виробу, структури технологічного процесу на базі особливих принципів орієнтування (рис. 1.10) [232, 233].

На першому етапі на підставі аналізу умов експлуатації, робочих навантажень деталі у виробі складається структура її експлуатаційних функцій (рис. 1.9). На другому етапі, виходячи із визначених експлуатаційних функцій, виконується поділ виробу на функціональні елементи за рівнем «глибини технології» для підсистем різних ієрархічних рівнів (рис. 1.8) від рівня виробу до рівня нанозон. На третьому етапі синтезу проектуються маршрути оброблення окремих поверхонь виробу для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик, з яких формується структура і маршрут ТП на базі групи 8 особливих принципів орієнтування (рис. 1.11) [233].

Розвиток рівня «глибини технології» забезпечується високим ступенем прецизійності металорізального обладнання та інструментів і технологічного оснащення. Розвиток рівня «ширини технології» визначається вдосконаленням технічного забезпечення, спрямованого на автоматизацію та інтенсифікацію технологічного процесу виготовлення виробів із регламентованими параметрами їхньої якості, необхідними експлуатаційними характеристиками та показниками

надійності. Реалізація цих двох підходів для принципу ФОП ТП забезпечує якісно нову сукупність властивостей виробів і їх якісно нову ступінь корисності [233].

Найраціональніша структура ТП при застосуванні принципу ФОП розробляється за умови технологічного забезпечення заданих експлуатаційних характеристик виробів для всіх ланок технологічного ланцюжка «вхідна заготовка – вихідна деталь». Такий підхід на даний час успішно реалізується із застосуванням розробленого для підсистеми формоутворення різанням (CAF-C) апарату імітаційно-реологічного моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану виробу в процесі його формоутворення [279].



Рис. 1.11. Основні етапи синтезу ТП при застосування принципу ФОП [233]

У той же час розроблення взаємозв'язків і встановлення закономірностей підсистеми технологічного успадкування як елемента PSPAS-системи під час вибору структури технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів із врахуванням комплексу властивостей матеріалу, параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин є важливим напрямком у розвитку технології машинобудування. Окрім того, розроблення підсистеми для реалізації комбінованих

та гібридних технологій в рамках PSPAS-системи сприятиме підвищенню ефективності застосування принципу ФОП при виготовлення машинобудівних виробів та зменшенню працемісткості на етапі інтегрованої системи КТПВ.

1.5. Технологічне успадковування параметрів якості виробів у структурі технологічного процесу їхнього виготовлення

1.5.1. Технологічне успадковування параметрів матеріалу виробів для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик

Вплив властивостей матеріалу виробів на експлуатаційні характеристики досліджено в теорії контактування твердих тіл, основні положення якої розроблено в 30-х – 40-их роках ХХ століття завдяки дослідженням І. В. Крагельського. Подальший розвиток теорія контактування твердих тіл отримала у роботах М. Б. Дьомкіна [121], Н. М. Дьяченко [131-133], І. В. Крагельського [160, 161], Е. В. Риждова [267, 270], Я. А. Рудзіта [265], А. М. Сулими [282], А. Г. Сулова [284, 286] та інших науковців.

У процесі експлуатації виробів технологічні дефекти, сформовані на стадії їхнього розроблення, перероджуються у пошкодження під дією різновидів силових навантажень, температурних впливів, механічних взаємодій, електричних і магнітних полів, агресивного середовища тощо.

Процесами, які призводять до пошкоджень деталей машин і їх відмов, є [213]: пластична деформація, що змінює напружено-деформований стан виробу; втома при статичних і циклічних знакозмінних навантаженнях; теплове руйнування внаслідок зміни структури матеріалу в процесі його нагрівання до критичних температур; руйнування під впливом агресивного середовища; зношування виробів внаслідок тертя.

При експлуатації вироби, як правило, піддаються комплексному впливу зовнішніх факторів, причому знос, що виникає при терті спряжених поверхонь, є характерним видом пошкодження більшості машин, їх механізмів і деталей [258, 259].

Зношування характеризується процесом відокремлення матеріалу від поверхні

тертя твердого тіла і (чи) збільшення його залишкової деформації в умовах тертя, що супроводжується поступовою зміною розмірів, форми і (чи) маси тіла [163].

Проблемам зношування присвячено роботи А. К. Зайцева, Д. В. Кузнецова, І. В. Крагельського, Б. І. Костецького, М. М. Хруцова, Д. Н. Гаркунова, Ф. Боудена і Д. Тейбора (Англія), Г. Флайшера (Німеччина), Мак-Грегора, Е. Рабіновича (США), Г. Данова (Болгарія) та інших фахівців.

Дефекти у матеріалі виробів, які є концентраторами напружень, пов'язані як з недосконалістю структури твердих тіл, так і з наслідками різноманітних впливів (механічних, теплових, лезового, абразивного оброблення тощо) [161]. Основний вплив на процес зношування визначається постійним виникненням і порушенням фрикційних зв'язків, що мають подвійну молекулярно-механічну природу [258]. У роботі [161] приведено класифікацію цих зв'язків, де виділено п'ять основних видів залежно від характеру взаємодії матеріалів – пружне або пластичне відтиснення матеріалу, мікрорізання, руйнування окисних плівок або руйнування основного матеріалу в результаті адгезії.

Зношування пов'язане з багатократним порушенням фрикційних зв'язків. При цьому I-III види фрикційних зв'язків виникають при механічній взаємодії матеріалів мікровиступів, IV – при механічній (пружно-пластичний контакт плівок) або молекулярній (схоплювання плівок) і V вид – при молекулярній взаємодіях [258, 259].

Повторні пластичні деформації внаслідок утворення чи порушення фрикційних зв'язків різко збільшують число дефектів, змінюють механічні властивості кристалів [161].

Згідно дислокаційної теорії дефектів Мотта, скупчення дислокацій є концентраторами напружень у випадку наявності перешкод у площині ковзання, що призводять до мікротріщин [160]. Згідно Гріффітсу, руйнування твердого тіла має місце, у якому прикладене до нього напруження розтягу досягає значення, рівного теоретичній міцності [161].

З точки зору трибології, поширеною причиною відмови машин і їхніх складових є вихід з ладу їх трибоспряджень. Відмови є наслідком неправильного

підходу до проектування та виготовлення виробів, коли вважається достатнім використання попереднього виробничого досвіду і не організується контроль якості проектованого трибоспряження відповідно до раціонального циклу випробувань (РЦВ). РЦВ – це сукупність послідовних етапів триботехнічних випробувань, що поступово ускладнюються (в основному на малогабаритних зразках) за попередньо розробленим планом експериментів. За результатами РЦВ поступово відсіюють поєднання матеріалів, які не мають істотних переваг над серійними. Одночасно на відповідних етапах РЦВ з достатньо високою точністю оцінюється довговічність трибоспряжень і втрати на тертя із врахуванням того, що процеси тертя та зношування супроводжуються великою кількістю явищ і характеризуються різними механізмами руйнування контактних поверхонь [294].

Для розрахунку експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів в процесі їхнього зношування, для вибору раціональних матеріалів, розмірів і конструкції спряжень за заданих умов їх роботи ДСТУ 2823-94 встановлено основні показники зношування [127]:

- знос U (мкм) – зміна розміру поверхні при її зношуванні, виміряна в напрямі, перпендикулярному до поверхні тертя;

- швидкість зношування $\gamma = \frac{dU}{dt}$ (мкм/год) – відношення величини зносу до часу зношування (ГОСТ 16429-70);

- інтенсивність зношування $j = \frac{dU}{ds}$ – відношення величини зносу до шляху тертя, вздовж якого відбувається зношування.

Згідно досліджень І. В. Крагельського [161] для опису процесів тертя та зношування доцільно використовувати п'ять узагальнених параметрів, зокрема, поверхневу твердість HB , питома навантаження p_a , інтенсивність зношування j , які характеризують питома зношування фрикційного зв'язку i_h [294]:

$$i_h = \frac{j \cdot HB}{p_a} \quad (1.13)$$

Інші дві характеристики фрикційного зв'язку базуються на фундаментальному понятті молекулярно-механічної теорії тертя – градієнті опору зсуву. При позитивному градієнті зсуву порушення фрикційного зв'язку обмежується поверхневими шарами виробу, при негативному – до процесу фрикційних взаємодій долучаються приповерхневі шари разом із основним матеріалом, що супроводжується заїданням, вириванням металу тощо [159].

Основний висновок дослідників зносостійкості матеріалів при їхньому терті по жорстко закріпленому абразиву – знос прямо пропорційний навантаженню q і обернено пропорційний твердості H [161]:

$$U \approx \frac{q}{H} \quad (1.14)$$

що є справедливим лише для заданих умов.

У загальному випадку величина зносу:

$$U = K \cdot q^x, \quad (1.15)$$

де K – поправний коефіцієнт; x – показник степеня, $x > 1$

Формулу (1.15) підтверджують результати робіт Eszlinger [17], В. М. Гутермана, М. М. Тенненбаума [115], Н. М. Серника [271], В. Г. Колесова [150], Д. І. Горіна [107, 108].

Д. І. Горіним [107] встановлено, що твердість не є достатньо надійним критерієм зносостійкості. Це підтверджують дослідження Rosen [51] і Wellinger [63].

Механізм руйнування матеріалу, згідно досліджень В. М. Ткачова [413], змінюється залежно від співвідношення твердості зношуваних частинок та матеріалу, що підтверджується роботами С. Л. Наумова [237].

В процесі зношування робочих органів сільськогосподарських машин найвірогіднішим руйнуванням поверхні сталі є багатократна деформація металу в результаті утворення пластично видавлених подряпин при терті абразивних частин [292]. У дослідженнях В. М. Ткачова [292] встановлено, що у загальному випадку зносостійкість залежить від твердості у степені більше 1.

Eszlinger [17] встановлено два механізми зношування: слабе зношування при пружному деформуванні поверхонь та інтенсивне зношування – при пластичному.

При цьому диференціюється зношування при значних навантаженнях в результаті пластичного деформування матеріалу закріпленими абразивними частинками, а при малих навантаженнях – зношування за рахунок здирання окисної плівки. Величина зносу визначається за формулою:

$$U = K_S \cdot K_W \cdot \left[\frac{P_i}{f(H)} \right]^\beta, \quad (1.16)$$

де K_S – постійна, що залежить від форми зерна;

K_W – постійна, що залежить від матеріалу абразивного зерна;

P_i – навантаження на одне зерно;

$f(H)$ – функція твердості;

β – показник степеня.

У частковому випадку отримано лінійну залежність відносної зносостійкості, що підтверджується результатами досліджень М.М. Хруцова і М.А. Бабічева [301] для різних матеріалів і сплавів на зношування при терті по абразивному полотні:

$$\varepsilon = b \cdot H, \quad (1.17)$$

де ε – відносна зносостійкість; H – твердість за Віккерсом; b – коефіцієнт пропорційності ($b \approx 7,3$).

У роботах [258, 259] приведено формулу для визначення зносу:

$$U = U_0 + \gamma \cdot t, \quad (1.18)$$

де U_0 – знос за період припрацювання пари тертя; γ – швидкість зношування; t – час.

Швидкість зношування визначається за формулою [258]:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= k_1 \cdot p^m \cdot v^n; \\ \gamma_2 &= k_2 \cdot p^m \cdot v^n, \end{aligned} \quad (1.19)$$

де γ_1, γ_2 – швидкості зношування деталей спряження; p – тиск на поверхні тертя; v – швидкість відносного ковзання; m, n – показники степенів $m=0,5-3$ і для більшості пар тертя $n=1$; k_1, k_2 – коефіцієнти зношування деталей спряження, що характеризують матеріал пари та умови зношування.

Коефіцієнти зношування, які визначають на підставі експериментальних

досліджень, залежать від параметрів, що характеризують склад, структуру і механічні властивості матеріалів пари (наприклад, його твердість H , межа текучості σ_T , модуль пружності E тощо); від властивостей поверхневого шару: його шорсткості, жорсткості, напруженого стану тощо (наприклад, від показників опорної поверхні b , ν); від виду тертя і мастила; від зовнішніх умов, що впливають на процес зношування – температури, накладання вібрацій, наявності вакууму тощо [258, 259].

У роботі [294] запропоновано сім критеріїв характеристик властивостей матеріалу пар тертя, які оцінюються при триботехнічних випробуваннях.

1. Макротвердість – опір матеріалу проникненню у нього твердішого матеріалу; характеризує тримку здатність матеріалу елемента пари.

2. Сумісність – критерій опору поєднання матеріалів заїданню та зношуванню.

3. Мікротвердість – твердість окремих структурних складових поверхневого шару елемента пари тертя, що визначає перетворення матеріалів у цьому шарі.

4. Зміна структури – поверхневого шару, що знаходиться в контакті матеріалу, який свідчить про пристосовуваність елементів пари тертя один до одного.

5. Напружений стан фрикційного елемента у деяких випадках має суттєвий вплив на зносостійкість матеріалів.

6. Припрацьованість – здатність пар тертя у початковий період поступово покращувати контактування поверхонь за рахунок їхнього згладжування та зміни властивостей поверхневих шарів, що при постійних зовнішніх умовах супроводжується зниженням коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування та виділення тепла, а також підвищенням тримкої здатності трибоспряження.

7. Фрикційно-зношувальні характеристики – вихідні характеристики, що отримують при заданих режимах випробувань.

Проведений огляд свідчить, що величина зносу спряжених поверхонь, які працюють в умовах тертя, безпосередньо залежить від твердості матеріалу їх деталей. Тому твердість матеріалу виробу при дослідженнях технологічного успадковування параметрів якості при виготовленні виробів, що працюють в умовах силових навантажень і інтенсивного зношування, розглядається як характеристика

для оцінки процесів деградації матеріалу та закономірностей побудови структури технологічних маршрутів поверхонь деталей машин.

1.5.2. Аналіз умов порушення гомогенності (однорідності) матеріалу виробу

Для більшості спряжень знос, як характерний вид пошкодження деталей машин, визначається процесами втоми за рахунок виникнення втомних мікротріщин і відокремлення частинок матеріалу або його окисних плівок в процесі багатократного навантаження одиничних нерівностей поверхонь тертя [258, 259].

Основним параметром оцінки втомної витривалості матеріалу виробу служить циклічна довговічність – число циклів напружень або деформацій, витриманих навантаженим об'єктом до утворення втомної тріщини певної протяжності або до втомного руйнування [126].

Контроль зародження дефектів, їх накопичення та перетворення у втомні пошкодження є набагато складнішим, ніж визначення кількості циклів до руйнування в процесі лабораторних випробувань у зв'язку із відсутністю об'єктивних кількісних характеристик фізичного стану матеріалу для однозначної оцінки кінетики його деградації та залишкового ресурсу конструкцій. Оскільки формоутворення втомної тріщини складно кількісно інтерпретується прямими фізичними методами, то на практиці використовують формальну методологію оцінки втомного пошкодження [169]. При цьому термін «пошкодженість матеріалу», що визначає ступінь порушення його гомогенності (однорідності), використовують для опрацювання результатів випробувань за різними методиками та переходу від результатів експерименту до оцінки втомної довговічності в експлуатації [126].

Тому актуальною проблемою втрати працездатності матеріалів є розроблення теоретико-експериментальних методів дослідження процесів генерування технологічних дефектів і розвитку пошкоджень на підставі аналізу гомогенності (однорідності) матеріалу [276].

Професор Б.І. Костецький [159] диференціює зношування на нормальний процес, що забезпечує однорідність поверхні матеріалу у межах ТУ, та патологічний

процес, який супроводжується порушенням гомогенності (однорідності) матеріалу поверхневого шару (рис. 1.12, а). Характеристики процесів зношування приведено у табл. 1.5. Аналогічний механізм прослідковується і для втоми металів (рис. 1.12, б) [158, 159].

Поряд із терміном «пошкоджуваність» використовують і термін «пошкодженість». Це пояснюється тривалістю фізико-хімічних процесів, що супроводжують як виготовлення виробів, та і їхню експлуатацію (рис. 1.12). Швидкоплинні процеси та процеси середньої швидкості (рис. 1.12) стосуються стадії розроблення деталей машин (рис. 1.1) і характеризуються пошкоджуваністю матеріалу заготовок виробів у їхніх життєвих циклах за рахунок формування технологічних дефектів. На противагу, процеси середньої швидкості та повільні процеси (рис. 1.13) визначаються пошкодженістю матеріалу заготовок виробів при переродженні технологічних дефектів у пошкодження на стадії експлуатації деталей машин у їх життєвих циклах. Такий підхід дозволяє розмежовувати процеси, що призводять до формування відмов і втрати машиною працездатності, та прогнозувати їхню еволюцію на різних етапах і стадіях життєвого циклу виробу.

Наслідком пошкоджуваності є технологічні дефекти від структурних концентраторів напружень і недосконалостей технологічних процесів на різних етапах їхнього проектування, а пошкодженості – пошкодження, що характеризується зміною структури, геометричних і фізико-механічних властивостей поверхневих шарів машинобудівного виробу під час його експлуатації [134, 182, 200].

У загальному випадку під пошкоджуваністю розуміють еволюційний процес нерівномірної зміни геометричної форми і розмірів контактуючих поверхонь спряжених деталей, структури і властивостей матеріалу поверхневих шарів, що охоплює важливі етапи та стадії життєвого циклу виробу [134, 200].

Поряд з тим пошкодженість – це процес втрати першопочаткових характеристик виробу при аналізі процесів деградації лише на стадії його експлуатації.

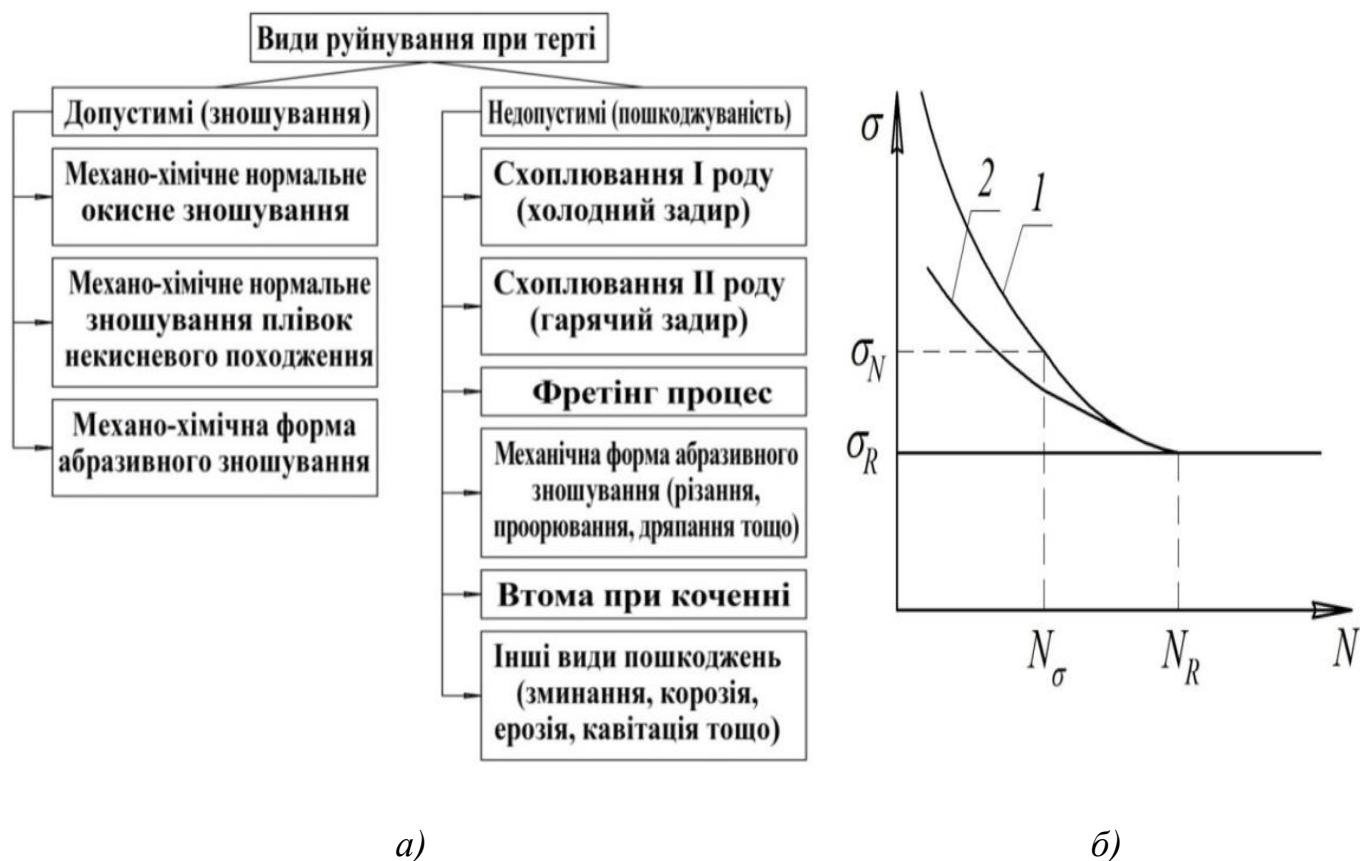


Рис. 1.12. Класифікація видів зношування та пошкоджуваності поверхонь деталей машин а) і діаграма витривалості сталі б): 1 – крива витривалості; 2 – крива пошкоджуваності

Таблиця 1.5

Характеристика процесів зношування виробів

| Нормальний процес | |
|---|--|
| Критерій | Результат (наслідок процесу) |
| <u>Зношування</u> – це процес поступової зміни розмірів деталей (зразків), що відбувається при терті (ДСТУ 2823-94). | <u>Знос</u> – це результат зношування, що оцінюється безпосередньо за зміною розмірів або непрямими ознаками (ДСТУ 2823-94). |
| Паталогічний процес | |
| Критерій | Результат (наслідок процесу) |
| <u>Пошкоджуваність</u> – це процес різко вираженої зміни геометричного стану поверхонь тертя, структури та властивостей поверхневих шарів. | <u>Пошкодження</u> – це результат пошкоджуваності, що проявляється у зміні макроеметричних характеристик, структури, властивостей і напруженого стану поверхневих шарів (ГОСТ 27.002-2015). |

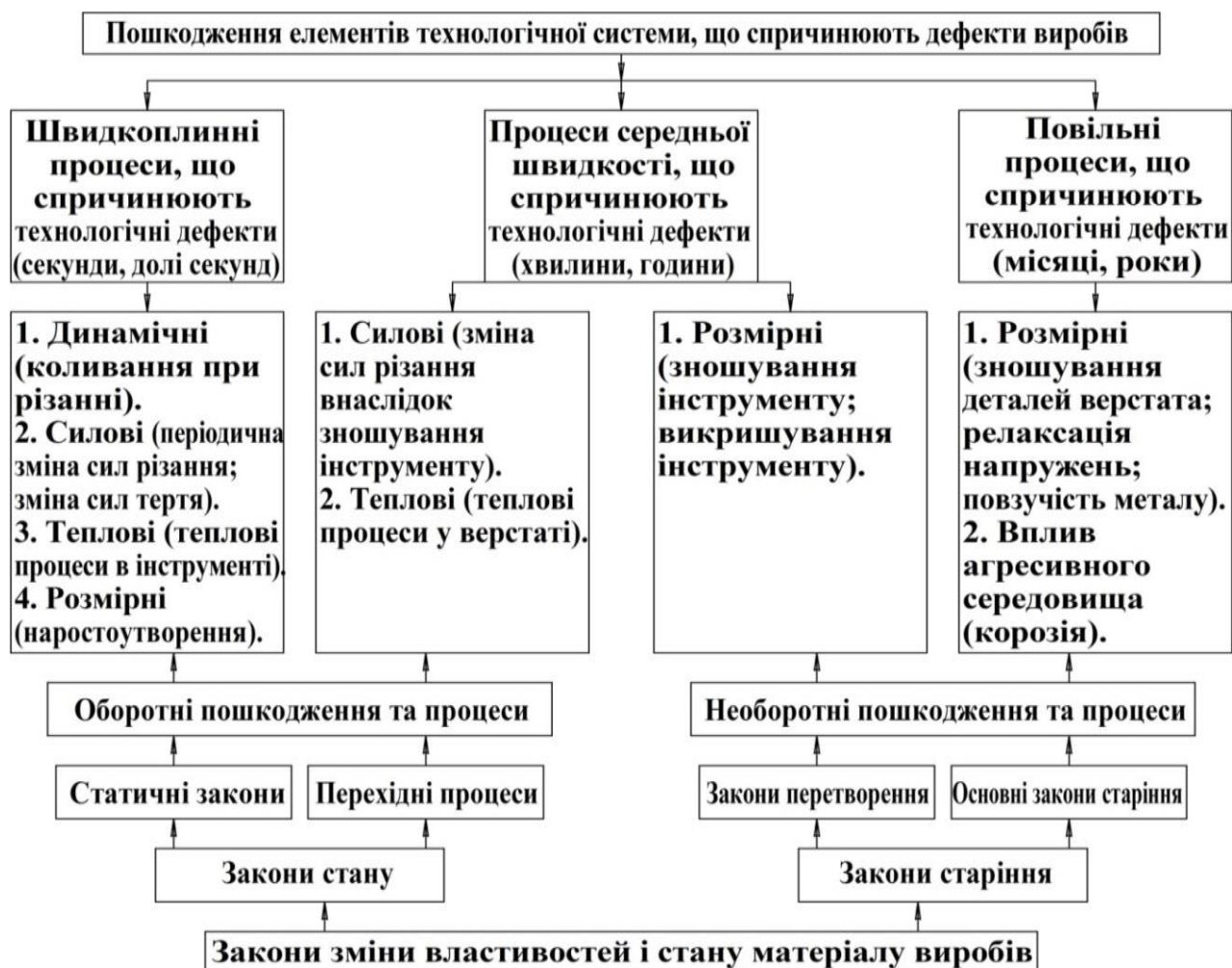


Рис. 1.13. Взаємозв'язок законів зміни властивостей і стану матеріалу виробів із пошкодженням елементів технологічної системи

Пошкоджуваність у загальному випадку характеризує ступінь однорідності матеріалу за рахунок процесів його деградації на важливих етапах і стадіях життєвого циклу виробу

1.5.3. Сучасні методи аналізу порушення гомогенності матеріалу виробів за ступенем його пошкоджуваності

У механіці сформовано три різних підходи (методи) до інтерпретування пошкоджуваності матеріалу, що визначає ступінь порушення його однорідності [302]: Пальмгрена-Майєра [49], Качанова-Работнова [30, 31, 192, 331, 332], Гріффітса та послідовників.

Згідно Пальмгрену-Майєру пошкодження D_n оцінюється відношенням напрацювання (кількості циклів навантаження) n до довговічності $N(\sigma)$ [49]:

$$D_n = \frac{n}{N(\sigma)}. \quad (1.20)$$

В межах теорії Пальмгрена-Майєра існує кінетичний і феноменологічний підхід для обґрунтування критичного значення $[D]$, що відповідає моменту руйнування [49].

Теоретичне обмеження для кінетичного підходу $[D]=1$ часто не забезпечується при експериментальних дослідженнях, оскільки сума накопичених пошкоджень до моменту руйнування на практиці змінюється в межах $[D] \in [0,2; 14]$ [276]. Для феноменологічного підходу знаходять конкретне значення $[D]$, аналізуючи вхідні дані, параметри процесів, різних матеріалів, типів конструкцій, програм навантаження тощо [169].

Із врахуванням усіх факторів при використанні кінетичного підходу виявляється нелінійний характер накопичення пошкоджень, при цьому повний спектр циклів навантаження поділяється на певну кількість груп. В межах визначеної групи діє свій закон накопичення пошкоджень, проте при цьому кожний із них залишається лінійним [4, 16, 169]:

$$D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i(\sigma)}. \quad (1.21)$$

В результаті розвитку теорії Пальмгрена-Майєра вдосконалено формулу (1.21) і залежність пошкодження від рівня напружень і фізико-механічних властивостей матеріалу (параметрів m_j) має вигляд [276]:

$$D_n = f\left(\frac{n}{N}, \sigma, m_j, \dots\right). \quad (1.22)$$

Модель пошкоджуваності Качанова-Работнова враховує розсіювання дефектів по об'єму технічного об'єкту і стосується повзучості матеріалів [276].

Відповідно до теорії Качанова внаслідок деформації повзучості, ослаблення матеріалу або його пошкодження фактична («справжня») площа сприйняття навантаження стає меншою від номінальної. Внаслідок цього ефективно

(«справжнє») напруження σ стає більшим «напруження в ослабленому перерізі» (net stress) σ_s [46].

Л.М. Качановим описано стан пошкодження скалярною змінною – суцільністю ψ ($0 \leq \psi \leq 1$), де $\psi = 1$ і $\psi = 0$ означає початковий непошкоджений стан і кінцево повністю пошкоджений стан [19, 20, 46].

Суцільність ψ характеризується ступенем поширення дефектів по об'єму навантаженого тіла [19, 46]:

$$\psi = \frac{\sigma}{\sigma_s}. \quad (1.23)$$

Крім того, Л.М. Качановим описано розвиток пошкодження за допомогою еволюційного рівняння [19, 46, 145]:

$$\dot{\psi} = -A \cdot \left(\frac{\sigma}{\psi} \right)^m. \quad (1.24)$$

де $\dot{\psi}$ і σ позначають першу похідну від пошкодження часу і напруження, а A і m – константи матеріалу.

Суцільність інтерпретується у вигляді відношення номінального напруження у визначеному перерізі до фактичного, яке збільшується за рахунок послаблення робочого перерізу недосконалостями структури досліджуваного матеріалу та його дефектами [46].

Пізніше Ю.М. Работновим [261, 262] модифіковано теорію Л.М. Качанова шляхом введення альтернативної змінної – параметра пошкоженості або пошкоженості $D=1-\psi$ ($0 \leq D \leq 1$).

У межах феноменологічної теорії руйнування використовується скалярна характеристика пошкоджуваності мікрodefектами D . Значення $D=0$ відповідає матеріалу з ідеальною непошкоджуваною структурою, а при $D=1$ утворюється магістральна тріщина та відбувається макроруйнування зразка [85, 86, 154].

Ю.М. Работновим висунуто гіпотезу, що пошкодження також впливає на швидкість повзучості $\dot{\epsilon}$ наступним чином [46]:

$$\dot{D} = -A \cdot \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^m, \quad (1.25)$$

$$\dot{\varepsilon} = B \cdot \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^n. \quad (1.26)$$

де A , B , m є константами матеріалу. Рівняння (1.25)–(1.26) відомі як теорія Качанова–Работнова, і є прототипом розробленої згодом моделі континуальної механіки пошкодження. Фізичне значення ψ і D зазвичай інтерпретується як зменшення навантаження тримкої ефективної області через розвиток порожнини [46].

В процесі аналізу відповідного закону зростання пошкоженості (табл. 1.6) отримують формули для розрахунку часу до руйнування під час повзучості та втоми [276].

Основна ідея механіки пошкоджуваного середовища полягає в описі утворення внутрішніх розривів за допомогою динамічної змінної стану – величини поля пошкоджуваності у скалярній формі [46].

Ступенем пошкоджуваності згідно третьої моделі, вперше розробленої Гріффітсом [8, 44, 50], служить пов'язана з довговічністю довжина тріщини [277, 278]:

$$D_\ell = \ell. \quad (1.27)$$

Виробничий досвід багаторічної експлуатації деталей і машин переконливо свідчить про зародження та розвиток дефектів на етапах конструкторсько-технологічної підготовки та виробництва продукції стадії розроблення виробу у його життєвому циклі і їхнього «переродження» у пошкодження на стадії експлуатації виробів.

Поряд з тим передчасні відмови, пов'язані із різноманітними процесами та явищами деградації матеріалу виробів, відбуваються за сукупного впливу несприятливих конструктивно-технологічних факторів, технологічного середовища, умов експлуатації, помилок і прорахунків на важливих етапах і стадіях життєвого циклу деталей і машин. Тому вже на етапі конструкторсько-технологічної

підготовки стадії розроблення виробу у його життєвому циклі потрібно прогнозувати величину пошкоджуваності, отриману конструкцією при її виготовленні та експлуатації [293].

Таблиця 1.6

Моделі накопичення пошкоджень при повзучості та втомі [278]

| Рівняння швидкості зміни пошкодженості | Автор/дослідник |
|--|--------------------------|
| $v_1 = \frac{dD}{dt} = C_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^m$ | Л.М. Качанов |
| $v_2 = \frac{dD}{dt} = C_2 \cdot \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^m \cdot \omega^\beta$ | Ю.М. Работнов |
| $v_3 = \frac{dD}{dt} = C_3 \cdot \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^m$ | С.О. Шестеріков |
| $v_4 = \frac{dD}{dt} = C_4 \cdot \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^m \cdot \frac{1}{1-\omega^q}$ | Дж. Леметр |
| $v_5 = \frac{dD}{dt} = C_5 \cdot \left(\frac{\sigma}{1-D} \right)^m \cdot \left(\frac{1}{1-\omega} \right)^{\Omega(\sigma)}$ | В.П. Голуб, А.В. Романов |
| $v_{I} = \frac{d(1-D_{nT})}{dn} = -C_N \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{1-D_{nT}} \right)^{m_c}$ | Л.А. Сосновський |
| $v_{II} = \frac{d(1-D_{nT})}{dn} = -C_K \cdot \left(\frac{\Delta K}{1-D_{nF}} \right)^{m_k}$ | |

У табл. 1.6 позначено: C , m , q , r , β – параметри матеріалу; $\Omega(\sigma)$ – певна функція напружень; $\Delta\sigma = \sigma_a - \sigma_{Rmin}$; $\Delta K = K_{max} - K_{th}$; σ_{Rmin} – нижня границя розсіювання границі витривалості; K_{max} , K_{th} – максимальне та порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень.

1.5.4. Аналіз пошкоджуваності та пошкоженості матеріалу виробів методом LM-твердості

Розвиток теорії накопичення розсіяних пошкоджень (дефектів) дає можливість проводити аналіз причин погіршення характеристик фізико-механічних властивостей матеріалів виробів [19, 20, 261, 262].

Проте, відсутність фізично й експериментально обґрунтованого критерію адекватної оцінки рівня поточної пошкоженості матеріалу стримує ефективну реалізацію цього підходу. Ця проблема особливо актуальна при моніторингу залишкового ресурсу (наприклад, до зародження в матеріалі мікротріщин) елементів конструкцій за тривалої експлуатації.

Спробу вирішити це завдання зроблено, наприклад, вченими Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України при розробленні та впровадженні нормативного документа РД 34.17.440/96 у 1999 році в дію [310]. Дослідженням реального ресурсу роторів, корпусних деталей та інших відповідальних деталей турбін скориговано застарілі підходи й запропоновано простішу, але, на думку розробників, надійну методику визначення коефіцієнта запасу за граничним рівнем пошкоджуваності матеріалу. Отримані результати відображено в роботі [310], з якої випливає, що її автори, у зв'язку з відсутністю достовірних моделей, які описують кінетику накопичення пошкоджень і, отже, їх граничних значень, обмежуються визначенням коефіцієнта запасу за сумарним граничним пошкодженням при повзучості (за часом до руйнування) й малоциклової втоми (за числом циклів), використовуючи при цьому лінійне сумування пошкоджень.

Твердість, як важливий механічний показник матеріалу, характеризує його міцність і пластичність та здатність протидіяти пластичній деформації й крихкому руйнуванню при контакті з індентором [234]. Поряд з тим традиційний метод визначення твердості є малоінформативним через слабку чутливість твердості до багатьох видів перетворення структури [211, 234] та малоефективним через неоднозначність кореляції значень твердості із характеристиками інших механічних властивостей, зокрема границь текучості та міцності [118, 220, 227]. Твердість не

відносять до фізичних констант, які характеризують матеріал, оскільки вона неоднозначна в інтерпретації, залежить не лише від властивостей матеріалу, а й умов та методу вимірювання [69, 234].

У зв'язку з цим твердість є лише узагальненою характеристикою, що відображає пружно-пластичні властивості матеріалу [155], тому виміряне під час досліджень середнє значення твердості не містить достовірної інформації при напружено-деформований стан матеріалу виробу [234].

Підвищення достовірності визначення характеристик поверхневого шару матеріалу забезпечується новим підходом у матеріалознавчих дослідженнях, що базується на використанні методу LM-твердості, розробленого під керівництвом академіка А.А. Лебедева [40, 208-213]. 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 найлегше реалізовується у інженерній практиці при використанні в якості механічної характеристики твердості, значення якої застосовують для непрямой оцінки властивостей [210, 211].

Гомогенність – це параметр, який повністю характеризує стан матеріалу при обробці результатів контролю твердості. Гомогенність при побудові статистичних теорій міцності описується розподілом Вейбулла [164, 210, 211]:

$$P(\sigma) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma}{k}\right)^m}, \quad (1.28)$$

де коефіцієнт однорідності Вейбулла (m) визначається як [164, 210]:

$$m = d(n) / (2,30259 \cdot S(\lg(H))), \quad (1.29)$$

$$S(\lg(H)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg(H_i) - \overline{\lg(H)})^2}, \quad (1.30)$$

$$\overline{\lg(H)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg(H_i). \quad (1.31)$$

Встановлено, що твердість поряд з іншими фізико-механічними характеристиками матеріалу визначається на макро-, мікро- та субмікрорівнях та інтерпретується як макротвердість (твердість), мікротвердість і нанотвердість [96,

152]. Поряд з тим напрацювання виробу підвищує твердість на всіх рівнях. Однак, якщо значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), що характеризує ступінь однорідності матеріалу, за результатами вимірювання твердості однозначно зменшується за результатами напрацювань, то в процесі вимірювань мікро- та нанотвердості цей показник практично не змінюється [210, 211].

На субмікрорівні визначається твердість блоків мозаїки у зернах і ділянок границь зерен, якщо вона залежить від кількості розірваних міжатомних зв'язків у субмікрооб'ємах [234]. Випробування на мікротвердість [295], що стосуються в основному матеріалознавчих досліджень, характеризуються вимірюванням твердості зерен, окремих фаз і структурних складових [234]. У даному випадку аналізується зміна властивостей лише окремих ділянок мікроструктури, що є недостатнім для перенесення отриманих результатів на макрорівень [96, 152]. При вимірюванні твердості на макрорівні розмір відбитка є на порядок більшим від лінійного розміру частинок мікроструктури та перевищує розмір усіх неоднорідностей [234]. У зв'язку з цим макротвердість є інтегральною характеристикою твердості сукупності зерен у поверхневому шарі виробу, що спричинюють протидію індентору при його контакті з поверхнею.

Ступеню розсіювання досліджуваної фізико-механічної характеристики, зокрема, твердості, відповідають інші статичні параметри, зокрема, коефіцієнт варіації, що показує, наскільки велике розсіювання величин, які містять розглядуваний обсяг даних, порівняно із середнім значенням твердості [211]:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}}{\bar{H}}, \quad (1.32)$$

де \bar{H} – середнє значення твердості.

У роботах [47, 305] представлено результати експериментів стосовно дослідження процесу накопичення пошкоджень у рейковій сталі під час напрацювання елементів стрілкового переводу на стадії експлуатації їх життєвих циклів. Елементи спряження стрілкового переводу на залізничних коліях виготовлено із рейкової сталі згідно ДСТУ та працюють в умовах циклічного

навантаження та інших факторів, що мають випадковий характер і спричиняють знос, відшарування металу тощо. При досягненні граничного ступеня накопичених пошкоджень деталі стрілкового переводу вимагають заміни.

Для контролю кінетики накопичення пошкодження вибрано три характерні зони вістряка, що найінтенсивніше зношуються: його початкова частина, на відстані 0,5 і 1,0 м від початку вістряка і рамна рейка. Рейкову сталь досліджено у початковому стані і після напрацювання. Для порівняння виміряно зміну твердості елементів стрілкового переводу [305].

За результатами досліджень після напрацювання (57,6 млн т бруutto проходження рухомого складу) встановлено збільшення твердості сталі рейки на 5,6 %, у початковій частині вістряка – на 12,3 %. На противагу, виявлено зменшення значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) для рамної рейки у 3,8 разів, для початкової частини вістряка – у 6 разів порівняно із початковими значеннями [305].

Для аналізу фактичної пошкоженості матеріалу виробів в результаті перетворення технологічних дефектів у технологічні пошкодження при інтенсивних умовах експлуатації елементів стрілкового переводу залізничної колії запропоновано параметр Δm , а для оцінки інтенсивності зростання пошкоженості – характеристику δ [47, 305]:

$$\Delta m = (m_n - m_{nm}) / m_n, \quad (1.33)$$

$$\delta = (m_n - m_{nm}) / m_{nm}. \quad (1.34)$$

де m_n , m_{nm} – значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m), виміряні відповідно для початкового і поточного стану матеріалу виробу.

На етапі експлуатації виробу визначається величина пошкоджуваності його матеріалу за результатами напрацювань. Однак досліджень стосовно прогнозування технологічної пошкоджуваності матеріалу виробу на етапі технологічної підготовки виробництва деталей машинна стадії їхнього розроблення у життєвих циклах виробів для проєктування раціонального маршруту оброблення поверхонь і аналізу процесу деградації матеріалу не проведено.

Поряд з тим висувається *гіпотеза* про існування критерію однорідності (гомогенності) матеріалу за розсіюванням твердості поверхневого шару деталей машин для аналізу технологічного успадковування під час виготовлення виробів, для розроблення технологічних маршрутів оброблення їхніх поверхонь зокрема і технологічних процесів виготовлення об'єктів машинобудівного виробництва загалом при реалізації принципу функціонально-орієнтованого проєктування.

1.6. Висновки розділу 1

1. Відсутність узагальненого методологічного підходу, що охоплює розроблення принципів технологічного успадковування параметрів якості при виборі структури технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів із врахуванням комплексу властивостей матеріалу, параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик відповідно до службового призначення та регламентованих показників надійності, є актуальною науково-прикладною проблемою в технології машинобудування.

2. Розроблення узагальненого методологічного підходу, що передбачає: формування комплексного критерію технологічного успадковування параметрів виробу для оцінки деградації властивостей його матеріалу як носія успадкованої технологічної інформації у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – вихідна деталь», формування концептуальної моделі із використанням принципів об'єктно- та функціонально-орієнтованого проєктування технологічних процесів під час виготовлення деталей машин, побудову методик, обчислювальних алгоритмів, аналітичних залежностей, підтвердження теоретичних досліджень експериментальними результатами у питанні технологічного успадковування, є науковим завданням, котре потребує вирішення.

3. Підвищення вимог до параметрів якості виробу при інтенсифікації технологій машинобудівного виробництва вимагає вдосконалення підходів до формування структури технологічних процесів із використанням принципів об'єктно-орієнтованого (ООП) і функціонально-орієнтованого проєктування (ФОП).

Подальший розвиток принципу ФОП як пріоритетного при виготовленні деталей машин забезпечується системно при застосуванні підходів теоретичних, експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання технологічних процесів із врахуванням технологічного успадковування характеристик від вхідної заготовки до кінцевої деталі.

4. Застосування автоматизованої системи аналізу формоутворення виробу (CAF-система), що реалізує принципи ФОП ТП в умовах інтегрованої системи конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, є обмеженим через розроблення лише підсистеми аналізу формоутворення виробу різанням методами реологічного імітаційного моделювання. Розроблення структури та методичного забезпечення системи аналізу формоутворення виробу (PSPAS-системи), як складової CAF-системи або незалежного елемента у структурі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, є важливим завданням при виготовленні машинобудівних виробів.

5. Розроблення структури та методичного забезпечення PSPAS-системи пов'язано як із дослідженням традиційних для CAF-системи підсистем (різання, пластичного деформування, формоутворення поверхневого шару та складання), так і з аналізом підсистеми технологічного успадковування параметрів якості виробів і підсистем, що описують характерні для принципу ФОП ТП комбіновані та гібридні технології.

6. Дослідження взаємозв'язків і закономірностей підсистеми технологічного успадковування як елемента PSPAS-системи при виборі структури технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів із врахуванням комплексу властивостей матеріалу, параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин є важливим напрямком у розвитку технології машинобудування.

7. Макротвердість матеріалу є інтегральною характеристикою властивостей поверхневого шару матеріалу після технологічного оброблення при успадковуванні властивостей від заготовки до деталі, яка для більшості досліджень аналізується за зміною абсолютного значення твердості.

8. Метод LM-твердості базується на аналізі розсіювання фізико-механічних характеристик матеріалу виробів, зокрема твердості, для дослідження їх поверхневого шару за результатами напрацювань. Метод LM-твердості для аналізу технологічного успадковування параметрів якості виробів за зміною властивостей матеріалу при їх виготовленні не використовувався.

8. Технологічне успадковування параметрів якості виробів після кожного технологічного переходу оброблення їх поверхонь забезпечується комплексом властивостей матеріалу, параметрів якості поверхонь і поверхневого шару деталей машин. Тому висунуто *гіпотезу* про існування критерію гомогенності (однорідності) матеріалу за розсіюванням твердості поверхневого шару деталей машин для аналізу технологічного успадковування під час виготовлення виробів для розроблення технологічних маршрутів оброблення їх поверхонь зокрема і технологічних процесів виготовлення об'єктів машинобудівного виробництва загалом при реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування.

1.7. Мета та основні завдання дисертаційної роботи

Мета роботи полягає у розробленні науково-прикладних основ аналізу процесів технологічного успадковування параметрів виробів за гомогенністю (однорідністю) їхнього матеріалу під час проектування 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

проектування технологічних маршрутів оброблення поверхонь для забезпечення параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів.

3. Розробити методику проектування 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 формоутворення, 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 формоутворення 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)» (ВПД(3)), для аналізу технологічних операцій та технологічних процесів виготовлення деталей машин.

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

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДОЛОГІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСПАДКОВУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЗА КРИТЕРІЄМ ОДНОРІДНОСТІ ЇХНЬОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИНЦИПУ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

2.1. Розроблення методології проєктування сучасних технологічних процесів із використанням принципів об'єктно- та функціонально-орієнтованого проєктування

Структура технологічних процесів виготовлення машинобудівних виробів проєктується відповідно до регламентованих ТУ їх параметрів якості, які забезпечують виконання службового призначення їхніми виконавчими та спряженими поверхнями (п. 1.2). Виконавчі (функціональні) поверхні деталей сприймають під час експлуатації інтенсивні механічні, температурні, триботехнічні навантаження, вплив агресивного середовища або поєднання даних процесів, що вимагає, поряд із регламентованими параметрами точності, якості поверхневого шару, відхилень форми та взаємного розташування поверхонь, врахування при проєктуванні ТП їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності [25].

Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей машин відповідно до визначених робочих навантажень реалізується принципом функціонально-орієнтованого проєктування при їхньому виготовленні [31-33].

Зв'язуючі (вільні) поверхні виробу виконують другорядні функції, тому для них забезпечуються регламентовані параметри їхньої якості згідно принципу об'єктно-орієнтованого проєктування при використанні типових технологічних маршрутів оброблення поверхонь. Поряд з тим, деталі невідповідального призначення проєктуються повністю за алгоритмом, що реалізує традиційну концепцію об'єктно-орієнтованого технологічного проєктування.

Більшість деталей мають і відповідальні виконавчі (функціональні) поверхні, і зв'язуючі (вільні) поверхні, тому їх проєктування відповідає поєднанню принципів

ООП і ФОП. Загальноприйнятою є назва функціонально-орієнтованого технологічного процесу при застосованих принципах ООП і ФОП при його розробленні або гібридного ТП при широкому застосуванні комбінованих і гібридних технологій. Врахування технологічного успадкування при виготовленні виробів є важливим етапом у проектуванні функціонально-орієнтованого (гібридного) ТП. Концептуальну модель проектування функціонального-орієнтованого (гібридного) технологічного процесу приведено на рис. 2.1.

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

У зв'язку з цим розширюється поняття «гібридний технологічний процес» при застосуванні функціонально-орієнтованих технологій у машинобудуванні (п. 1.2). При цьому розроблення структури технологічного маршруту оброблення виконавчих поверхонь виробів здійснюється за принципом ФОП ТП, а вільних поверхонь – за принципом ООП ТП, що в процесі їхньої реалізації забезпечує конкурентоздатність виробів раціональним поєднанням експлуатаційної надійності (ФОП ТП) і мінімально можливої для заданих умов собівартості виготовлення (ООП ТП) при дотриманні регламентованих параметрів якості деталей машин.

На початковому етапі характеристики об'єкту машинобудівного виробництва (машини) встановлюються службові призначення деталей, аналізуються норми їхньої точності та ТУ згідно принципу ООП (рис. 2.1). Поряд з тим, згідно принципу ФОП розраховуються параметри надійності кожної деталі за регламентованими показниками безвідмовності та довговічності машини із використанням математичного апарату теорії розмірних ланцюгів. Розрахунок попереднього типу виробництва та його організаційної форми, відпрацювання конструкції деталі на технологічність, вибір і економічне обґрунтування методу отримання заготовки здійснюються за традиційною методикою ООП.

Розроблення структури технологічних маршрутів оброблення вільних і виконавчих поверхонь має відмінності. Технологічні маршрути оброблення вільних поверхонь проектують при покроковому виконанні взаємопов'язаних етапів за

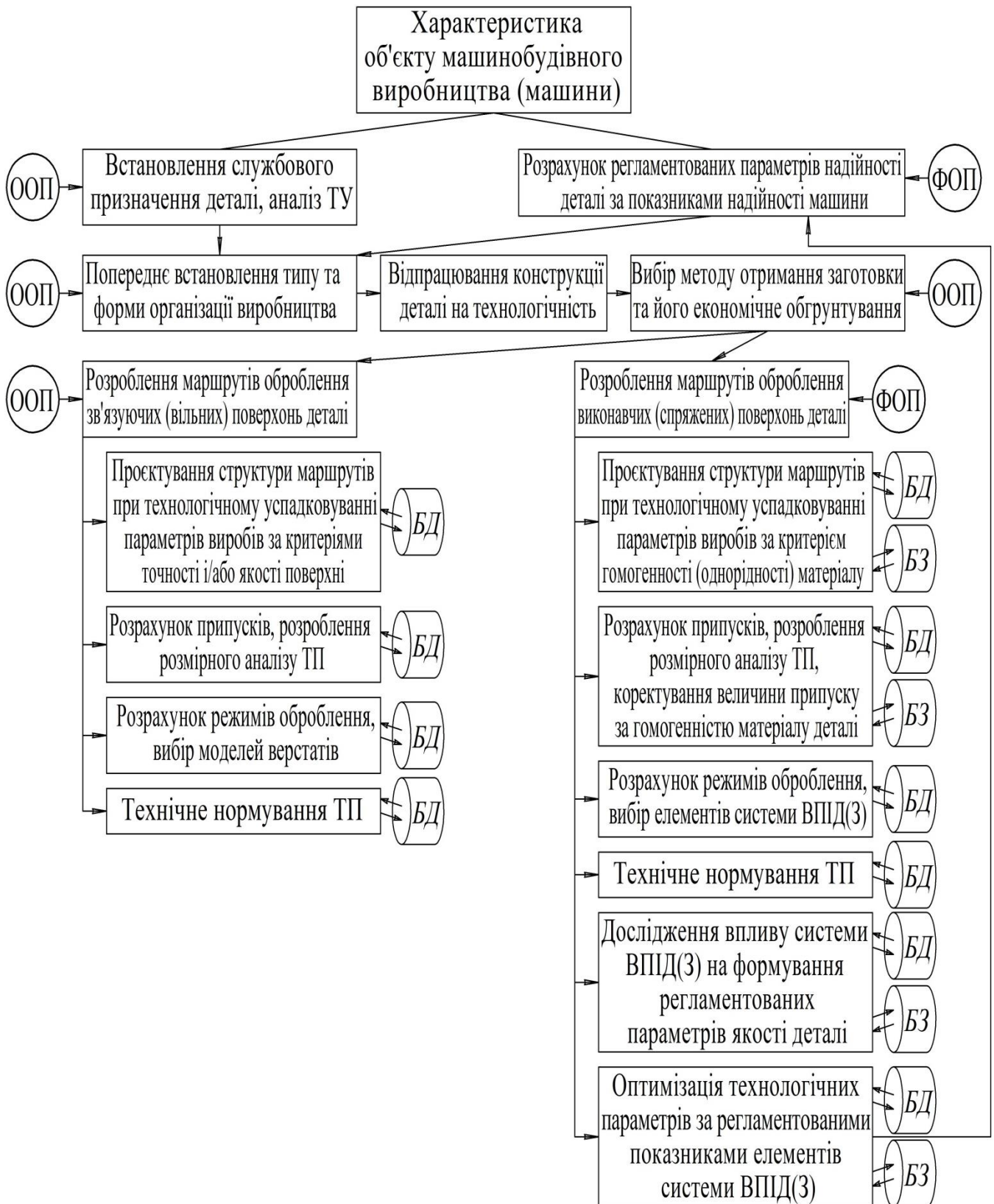


Рис. 2.1. Концептуальна модель розроблення технологічного процесу виготовлення деталі машини із використанням принципів ООП і ФОП – функціонального-орієнтованого (гібридного) ТП

принципом ООП (рис. 2.1): вибір методів оброблення вільних поверхонь при технологічному успадкуванні параметрів виробу за граничним критерієм або забезпечуваної точності (пріоритетно), або якості поверхневого шару; розрахунок припусків і виконання розмірного аналізу; розрахунок режимів оброблення з вибором металорізального інструменту і моделей металорізальних верстатів; технічне нормування ТП [193].

На початковому етапі проєктування технологічного маршруту оброблення виконавчої поверхні має свою специфіку. Мікро- та макронеоднорідності у поверхневих шарах виробів, які зароджуються та розвиваються після заготівельного виробництва, спричинені вібраціями у системі ВПД(З), неоптимальними режимами різання, зношуванням елементів технологічної системи тощо, визначають зміну механічних характеристик матеріалу та їхнє розсіювання. У зв'язку з цим, після кожного технологічного оброблення змінюються не лише точність і параметри поверхневого шару, а й характеристики матеріалу (міцність, твердість тощо), які забезпечують експлуатаційні характеристики та показники надійності. Тому гомогенність (однорідність) матеріалу деталей машин поряд із точністю та якістю поверхневого шару розглядається як параметр для аналізу технологічного успадкування за оцінкою деградації властивостей матеріалу для виконавчих (функціональних) поверхонь об'єктів машинобудівного виробництва у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – вихідна деталь» (рис. 2.1) [34, 35, 164].

Розроблення структури технологічних маршрутів оброблення виконавчих поверхонь деталей за принципом ФОП вимагає використання інформації із бази даних (БД) або за результатами оброблення дослідних зразків (зразків-свідків) (рис. 2.1). Отримані на даному етапі результати застосовують при коректуванні значення припуску на механічну обробку за величиною дефектного шару матеріалу.

Розрахунок режимів різання призначений не лише для вибору металорізального інструменту та металорізального верстату, а й для забезпечення раціональних параметрів елементів системи ВПД(З) (рис. 2.1), що оптимізує значення елементів штучного часу в процесі технічного нормування ТП.

Дослідження впливу елементів системи технологічного середовища «металорізальний верстат – пристрій – металорізальний інструмент» на забезпечення регламентованих параметрів якості передбачає розроблення математичних моделей для опису реальних фізичних процесів і їхнє вирішення засобами прикладного програмного забезпечення. Розраховані показники надійності для визначеного технологічного переходу, технологічної операції порівнюються із регламентованими показниками надійності елементів системи ВПД(З), на підставі чого приймається рішення про корекцію технологічного маршруту та оптимізацію технологічних параметрів [202].

Технологічні процеси виготовлення деталей машин, що не мають важливих виконавчих (функціональних) поверхонь, проектують, як правило, за алгоритмом об'єктно-орієнтованого технологічного проєктування за критерієм мінімальної собівартості виготовлення виробів.

Незважаючи на поєднання принципів ООП і ФОП при проєктуванні визначеної категорії деталей машин, пріоритетне місце займає реалізація принципу ФОП з огляду на забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів при їхньому подальшому застосуванні [189].

Формування вихідних параметрів виконавчих і вільних поверхонь машинобудівних виробів згідно принципу ООП ТП, як правило, здійснюється за лімітуючим критерієм забезпечення регламентованої технічними вимогами точності, якості поверхневого шару або відхилень форми та взаємного розташування поверхонь. Лімітуючим критерієм вважають той параметр якості, до якого встановлено найвищі вимоги. У практиці машинобудівного виробництва лімітуючим параметром найчастіше служить точність оброблення, що забезпечується відповідними квалітетами IT5-IT14 [193].

Виходячи із досяжної точності вхідної заготовки або характеристик її початкового мікрорельєфу (заданими конструктором параметрами шорсткості Ra або Rz), розробляється маршрут оброблення визначеної поверхні із технологічних переходів: чорнових, напівчистових, чистових, фінішних або викінчувально-зміцнювальних для забезпечення регламентованої конструкторсько-технологічною

документацією параметрів якості визначеної поверхні. При цьому точність 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. Відповідно до структури технологічного маршруту після чергового технологічного переходу відбувається уточнення параметрів визначеної поверхні згідно принципу технологічного успадковування для забезпечення ТУ. На останньому технологічному переході забезпечуються регламентовані технічними вимогами параметри якості визначеної поверхні [193].

Забезпечення параметрів якості виробів здійснюється за допомогою технологічної системи (п. 1.2, рис. 1.4). Виконання технологічних переходів на визначеній технологічній операції реалізується технологічною системою ВПД(З), а оброблення заготовки забезпечується елементами технологічного середовища. Для визначеної технологічної операції металорізальний верстат та пристрій на металорізальному верстаті служать для забезпечення усіх регламентованих для даної операції параметрів якості виробів. Поряд з тим, металорізальні інструменти є гнучкими елементами системи ПІВ, що дозволяє коригувати параметри виробів за допомогою раціонального вибору їхніх конструктивних і геометричних параметрів для заданого оброблюваного матеріалу та виду оброблення.

Однак вплив елементів технологічного середовища на забезпечення регламентованих параметрів якості виробів для принципу ООП ТП і врахуванням технологічного успадковування досліджено недостатньо.

При системних дослідженнях застосування принципів ФОП і ООП завдання ускладнюється і його розв'язання містить два етапи. На першому етапі проєктують маршрути оброблення виконавчих поверхонь: для ООП – за типовими технологічними маршрутами, для ФОП із врахуванням експлуатаційних характеристик та умов деградації оброблюваного матеріалу машинобудівного виробу. На другому етапі здійснюють дослідження впливу елементів технологічного середовища на забезпечення регламентованих параметрів якості виробів і

показників їхньої надійності лише для виконавчих поверхонь в процесі реалізації принципу ФОП ТП (рис. 2.1).

Згідно принципу ФОП ТП при виготовленні машинобудівних виробів забезпечуються їхні необхідні експлуатаційні характеристики відповідно до службового призначення. Однак ДСТУ і стандарти ISO регламентують показники надійності, серед яких найважливішими є параметри безвідмовності та довговічності. Тому для ефективного використання принципу ФОП ТП у машинобудівному виробництві необхідно забезпечити регламентовані ТУ показники безвідмовності та довговічності деталей машин, які визначають експлуатаційні характеристики (дод. В1-В4).

Для забезпечення параметрів якості виконавчої поверхні на другому етапі реалізації принципів ФОП ТП за результатами математичного моделювання визначаються дійсні показники надійності і, при порівнянні їх з регламентованими, за потреби коректуються параметри технологічної операції. Окрім того, формується та розв'язується оптимізаційна задача синтезу режимів оброблення.

Тому прогнозування регламентованих службовим призначенням показників надійності деталей машин, які визначають забезпечення як параметрів їхньої якості, так і їхніх експлуатаційних характеристик при виготовленні виробу у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – вихідна деталь» із врахуванням стадій і етапів життєвого циклу виробу та врахування принципу технологічного успадковування його властивостей, є одним із важливих завдань у технології машинобудування (рис. 2.2).

При аналізі вхідних даних для проектування ТП виготовлення виробу і попередньому розробленні технології аналізуються регламентовані вхідні показники надійності деталі, встановлені розрахунком розмірних ланцюгів у машині (рис. 2.2). На підставі структурного аналізу, синтезу конкурентних варіантів технологічного процесу та вибору раціонального варіанту ТП встановлюється кількість підсистем (операцій і переходів) технічної системи (ТП) і аналізуються можливі стани їх функціонування. Після опрацювання даної інформації для кожної підсистеми розробляється технологічний граф надійності із використанням ланцюгів Маркова.

На підставі технологічного графу формується система диференціальних рівнянь, яка вирішується за встановленими крайовими (початковими) умовами. За результатами математичного моделювання визначені службовим призначенням показники надійності узгоджуються із регламентованими параметрами безвідмовності та довговічності (ймовірність безвідмовної роботи, гаммі-відсоткове напрацювання до відмови, ресурс тощо) і коректується (за потреби) структура визначених технологічних операцій зокрема і технологічного процесу загалом (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Блок-схема взаємозв'язків забезпечення регламентованих параметрів якості машинобудівних виробів за умови недосягнення граничного стану металорізальним верстатом, верстатним пристроєм і металорізальними інструментами при обробленні виробу із врахуванням показників надійності підсистем технічної системи

Прогнозування ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості машинобудівних виробів за умови недосягнення граничного стану металорізальним верстатом, верстатним пристроєм і металорізальними інструментами при

обробленні виробу на окремому технологічному переході, окремій технологічній операції запобігає наближенню до граничного стану елементів технологічного середовища (в першу чергу металорізального інструменту) та дозволяє оптимізувати технологічний процес за рахунок коректування його структури на підставі результатів математичного моделювання.

Поряд з тим натурні випробування виробів після забезпечення регламентованих параметрів їхньої якості забезпечують визначення показників надійності виробів в умовах максимально наближених до експлуатаційних.

Створенню методик розроблення пріоритетних етапів для концептуальної моделі проєктування технологічного процесу із використанням принципу ФОП (рис. 2.1) присвячений даний розділ.

2.2. Дослідження технологічного успадковування параметрів якості виробів за критерієм гомогенності (однорідності) матеріалу

2.2.1. Обґрунтування гомогенності матеріалу як параметра для аналізу технологічного успадковування характеристик поверхонь оброблюваних виробів

ТУ на вироби, як правило, не регламентують увесь комплекс основних параметрів інженерії поверхні, а часто обмежуються значеннями шорсткості поверхні та її мікротвердості. Крім того, не завжди враховуються як структура операцій, режими різання матеріалів, прогресивні методи оброблення, які вибирають загалом з умови забезпечення високої продуктивності, так і властивості матеріалу, що змінюються під дією навантажень, високих температур, впливу агресивного середовища тощо. Внаслідок цього при різних технологічних процесах виготовлення виробів отримують деталі із різними експлуатаційними характеристиками та ступенем надійності, що можна прослідкувати на прикладі прецизійних шпинделів, турбінних лопаток, складних корпусів тощо [33, 34].

Структура технологічного процесу, режими різання, методи контролю параметрів тощо істотно впливають на зародження технологічних дефектів на

стадіях розроблення виробу та їхню еволюцію на стадії експлуатації (рис. 1.1). Кожний вид технологічного впливу характеризується типовими видами дефектів, пов'язаними з визначеними порушеннями послідовності процесу або несприятливим поєднанням факторів [24, 27, 28].

При проектуванні та виготовленні деталей зокрема і машин загалом в умовах змінності експлуатаційних навантажень для оцінки структурної неоднорідності та розсіювання механічних характеристик матеріалу під впливом технологічних дефектів (мікропори, раковини, концентратори напружень тощо) широко застосовують ймовірнісні методи оцінювання вихідних характеристик виробів [164].

В рамках втомної природи процесу зношування руйнування поверхневих шарів виробів пов'язують із виникненням втомних тріщин і відокремленням від основного матеріалу мікрочастинок внаслідок сумарної дії окремих факторів при багатократному навантаженні фрикційних зв'язків [38, 39, 164].

Встановлено [36, 164], що локальна природа руйнування в процесі зняття шару металу лезовим обробленням визначає потребу в аналізі процесу накопичення технологічних дефектів у матеріалах і сплавах при їх механічному обробленню та прогнозування їх «переродження» у технологічні пошкодження при несприятливих умовах експлуатації виробів. Загалом процес руйнування складається із таких етапів [164, 170]: нагромадження дефектів, формування технологічних пошкоджень і порушення суцільності матеріалу у полі дії напружень та деформацій (50-90 % загальної тривалості процесу); розвиток мікротріщин у дефектному середовищі; розвиток тріщин і відокремлення частинок матеріалу при заданих для заготовки питомих навантаженнях і переміщеннях; відмова виробу.

Відповідно до ДСТУ 2860-94 вид відмови – це одиниця класифікації відмов, що впливає із встановлених критеріїв: характеру, причини, наслідків відмови, функції, здатність виконання якої втрачена, або зміни стану об'єкта.

ДСТУ 2860-94 регламентує конструктивну, виробничу, експлуатаційну та деградовну відмови (рис. 2.3) [164], що пов'язані із стадіями розроблення та експлуатації виробів у їхніх життєвих циклах (рис. 1.1).

Зокрема, на стадії розроблення виробу у його життєвому циклі конструктивні відмови пов'язані з недосконалістю або порушенням встановлених правил і (або) норм проєктування і конструювання, у той час як виробничі – із недосконалістю або порушенням загальноприйнятих правил і методів проєктування технологічного процесу виготовлення або ремонту [164]. Експлуатаційна відмова на стадії експлуатації виробу пов'язана з порушенням встановлених правил і (або) умов експлуатації.

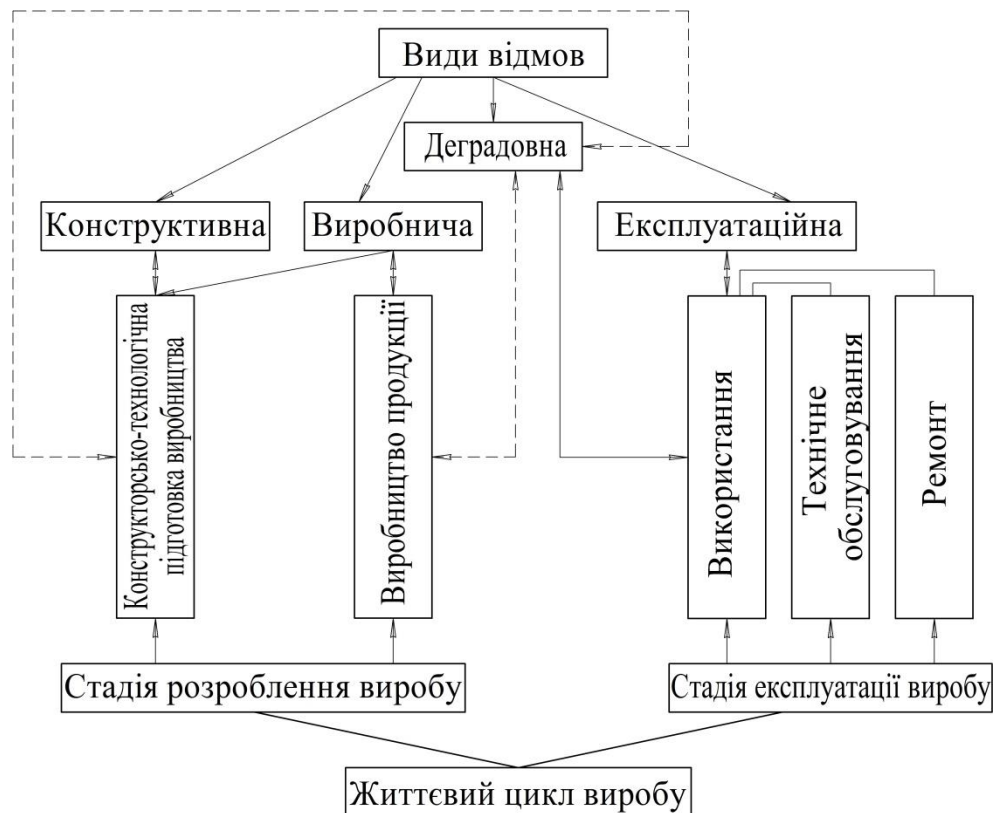


Рис. 2.3. Види відмов машинобудівних виробів

Деградовна відмова визначається умовами експлуатації виробів і обумовлена природними процесами старіння, зношування, корозії і втоми (дод. В2) за умови дотримання всіх встановлених правил і (або) норм проєктування, виготовлення та експлуатації. Поряд з тим, деградовні відмови, зароджуючись із технологічних дефектів на стадії розроблення виробу, перероджуючись у пошкодження на стадії його експлуатації, пов'язані із незабезпеченням експлуатаційних характеристик

виконавчих і спряжених поверхонь деталей машин і показників надійності виробів та вимагають ґрунтовних досліджень.

Деградовні відмови (рис. 2.3) призводять до порушення однорідності поверхневого шару матеріалу виробів і його технологічної пошкоджуваності, яка характеризує процес зародження та розвиток технологічних дефектів на стадії розроблення деталей машин у їхніх життєвих циклах, що трансформується у пошкодженість виробів на стадії їхньої експлуатації.

Підвищення ефективності застосування як принципів ООП для розроблення технологічних маршрутів оброблення вільних, неспряжених поверхонь деталей машин, так і принципів ФОП для їх виконавчих, спряжених поверхонь досягається аналізом деградовних процесів на мікро- та нанорівнях у матеріалі виробів на стадіях їхнього розроблення у життєвих циклах машинобудівної продукції. В основі цього аналізу покладено оцінювання ступеня однорідності структури матеріалу після технологічних оброблень на окремих переходах відповідно до розроблених маршрутів оброблення поверхонь для забезпечення регламентованих параметрів якості деталей, їх експлуатаційних характеристик і показників надійності. Наповнення репозиторія даних відбувається як на етапі КТПВ при виборі раціональної структури технологічних маршрутів оброблення поверхонь, так і в процесі оброблення дослідних зразків (зразків – свідків) і під час виготовлення деталей машин для підтвердження результатів підготовки виробництва методами неруйнівного контролю.

Такий підхід вимагає комплексного аналізу втрати виробом працездатності на усіх рівнях досліджень, починаючи від субмікроскопічного (атомарно-молекулярні взаємодії) та закінчуючи макроскопічним.

Дана проблема ускладнюється при відомій реалізації принципу ФОП ТП деталей машин, оскільки при виготовленні машинобудівних виробів потрібно виявити не лише видимі (макро-) дефекти, а і встановити технологічні дефекти на мікро-, нанорівнях та прогнозувати/усунути виникнення для несприятливих експлуатаційних умовах ланцюжка «технологічний дефект – пошкодження – відмова» на стадії експлуатації виробів.

Для врахування принципів технологічного успадковування властивостей виробів аналізується весь технологічний ланцюг у їхніх життєвих циклах, починаючи із ТП виробництва заготовки та закінчуючи випробуваннями перед запуском деталей і машин в експлуатацію. Для врахування умов експлуатації визначених деталей в технічній системі або машині і технологічного забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності, реалізується алгоритм прийняття рішень щодо вибору раціональної структури та параметрів технологічного процесу, виходячи з технологічного успадковування властивостей виробів від заготівельних до фінішних і викінчувально-зміцнювальних технологічних операцій оброблення виробів [182, 188, 200]. Результатом досліджень технологічного успадковування параметрів якості виробів є аналіз динаміки зміни однорідності структури матеріалу після технологічних оброблень на окремих переходах відповідно до розроблених маршрутів оброблення поверхонь для забезпечення регламентованих параметрів якості деталей (рис. 2.4).

Аналіз змін однорідності матеріалу, що забезпечуються різними методами на етапі заготівельного виробництва та експлуатації виробів [184, 185, 193], доцільно реалізувати для поверхонь виробів під час їхнього виготовлення. Це дає змогу перевірити правильність побудови технологічних маршрутів оброблення поверхонь виробів відповідно до ТУ.

У практиці технології машинобудування гомогенність (однорідність) матеріалу описується коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m), за зміною якого аналізують стан поверхні виробу під час його виготовлення або експлуатації для конкретного матеріалу [170, 173-180]. Для іншого матеріалу, з іншими фізико-механічними властивостями, динаміка зміни стані поверхні буде іншою.

Тому для конкретизації однорідності поверхневого шару машинобудівного виробу необхідно застосовувати інші характеристики, зокрема, константи матеріалу та технологічну пошкоджуваність, встановивши їхній зв'язок із коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m) (рис. 2.4).

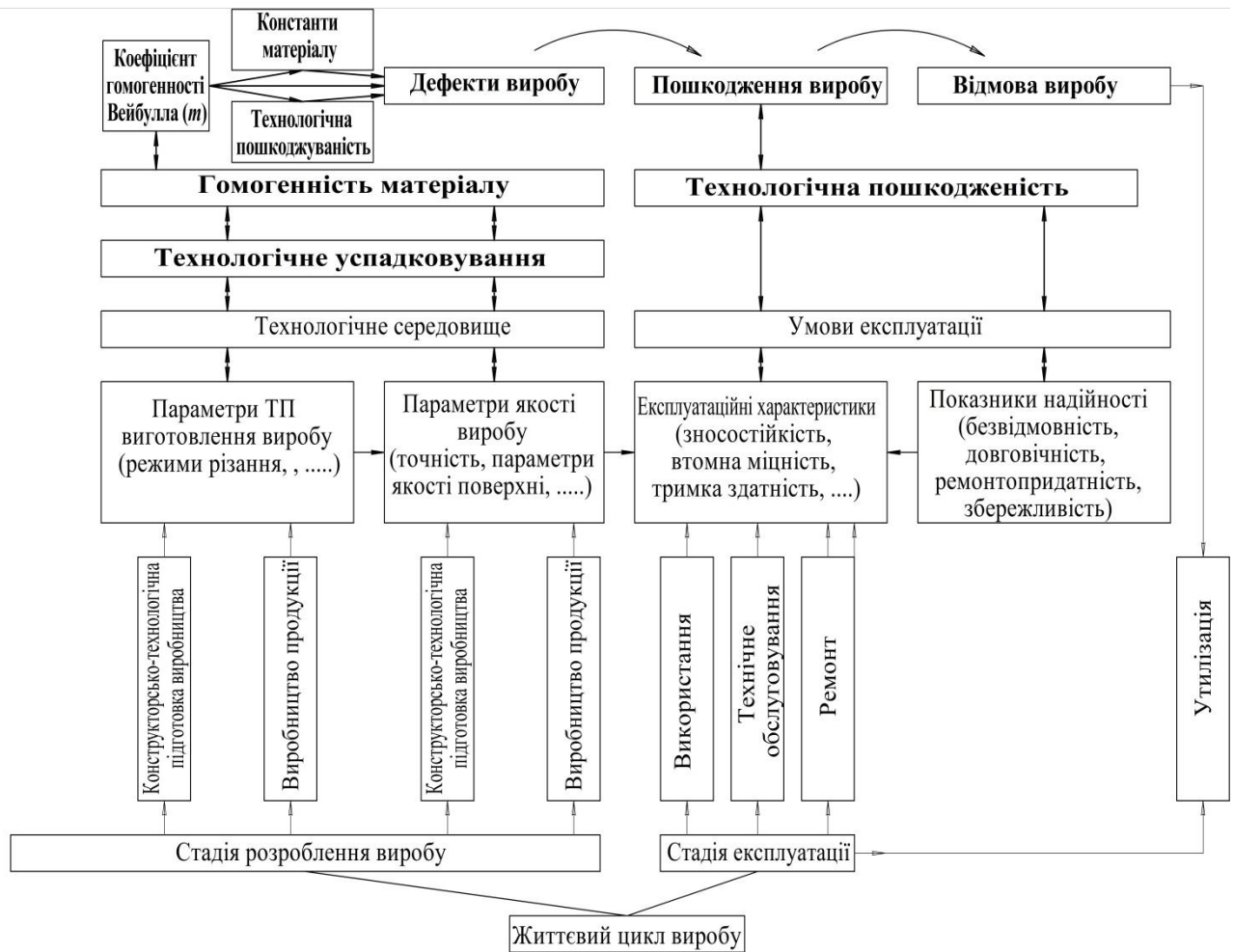


Рис. 2.4. Аналіз стадії розроблення виробу за гомогенністю (однорідністю) матеріалу

При проектуванні машин і механізмів велике значення серед механічних характеристик матеріалів має міцність, причому для окремо взятого зразка міцність є випадковою величиною, яка визначається неспостережуваними прихованими дефектами, включеннями, тріщинами, іншими порушеннями і особливостями структури [164, 213].

Під час експлуатації машинобудівні вироби часто працюють як в умовах однократних, так і знакомінних циклічних навантажень, що впливають на наявні технологічні дефекти, перетворюючи їх у пошкодження, та викликають появу нових недосконалостей у структурі матеріалу.

У загальній формі міцність матеріалу описується формулою Вейбулла у трьохпараметричній формі [102]:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^m}, \quad x \geq a; a \geq 0; b, m \geq 0, \quad (2.1)$$

де a – істинна границя витривалості; у розрахунках часто приймають $a=0$.

При $a=0$ формула (2.1) матиме вигляд:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^m}, \quad (2.2)$$

Теоретичне обґрунтування розподілу Вейбулла, поряд із задовільною відповідністю моделей (2.1), (2.2) результатам експериментальних досліджень, підпорядковується *принципу найслабшої ланки*. Для зразка матеріалу, розділеного на множини n частин у довільному вигляді, міцність частин є незалежною і загальна міцність визначається мінімальною міцністю частин [213]:

$$\xi = \min\{\xi_1, \dots, \xi_n\}, \quad (2.3)$$

причому функції розподілу описуються співвідношенням:

$$F(x) = 1 - (1 - F_1(x)) \cdot \dots \cdot (1 - F_n(x)). \quad (2.4)$$

Міцності окремих частин описуються розподілами Вейбулла з однаковими a ; m і різними b . При $1 \leq i \leq n$ отримаємо [213]:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^m}; \quad b = \left(\sum_{i=1}^n b_i^{-m}\right)^{-1/m}. \quad (2.5)$$

В рамках синергетичного підходу для опису процесу технологічного успадкування властивостей виробів на етапах і стадіях їхніх життєвих циклів визначається обмежена кількість алгоритмів функціонування для автоматизованого забезпечення експлуатаційних характеристик і регламентованих параметрів якості продукції [188, 193, 199]. Це зумовлює вибір узагальнених критеріїв оцінки деградації властивостей матеріалу для аналізу технологічних параметрів при виготовленні деталей машин.

У зв'язку з гіпотезою гомогенності (однорідності) матеріалу, що визначається певними характеристиками, розглядається як параметр для аналізу технологічного успадкування характеристик поверхонь виробів після їхнього механічного

оброблення, який інтегрально характеризує стан матеріалу після опрацювання результатів вимірювань твердості [203, 204].

Характерною особливістю принципу ФОП ТП є аналіз процесів від нанозон до виробу загалом залежно від поставлених виробничих завдань (п. 1.3.2). У процесі технологічного успадковування параметрів виробу макротвердість слугує інтегральною характеристикою матеріалу у його поверхневому шарі виробу. Аналіз динаміки зміни макротвердості визначає пошук оптимальних варіантів структури технологічних маршрутів оброблення поверхонь виробу для реалізації технологічного забезпечення підсистем виробу залежно від експлуатаційних вимог.

Працездатність деталей машин визначається умовами та особливостями їх 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 [223]:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, a_i) \leq \sigma_{екв.}, \quad (2.6)$$

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

Константи матеріалу a_i визначають для одновісного розтягу, одновісного стиску та кручення, із залежності (2.6):

$$F_1(\sigma_p, a_i) = \sigma_{екв.}; F_2(\sigma_{ст}, a_i) = \sigma_{екв.}; F_3(\tau_{кр}, a_i) = \sigma_{екв.}, \quad (2.7)$$

де $\sigma_p, \sigma_{ст}, \tau_{кр}$ – відповідно нормальні напруження розтягу та стиску, дотичні напруження кручення.

Система (2.7) представляє вхідні константи у вигляді функцій границь міцності за умови відповідних навантажень. Критерії міцності формулюються рівняннями із мінімальною кількістю констант матеріалу, які визначаються із найпростіших дослідів та зручні для практичного використання. При цьому критерії міцності із однією константою описують стан матеріалу, що знаходиться у стані ідеально пластичного або ідеально крихкого тіла. Якщо опір матеріалу вважають

функцією лише напруженого стану, то його основні механічні властивості описуються розрахунковим рівнянням із двома константами.

Найлогічнішою геометричною інтерпретацією критеріїв граничного стану матеріалу виробу є регулярні (гладкі) поверхні, в кожній точці яких можна побудувати лише одну дотичну площину.

Встановлено, що руйнування визначається взаємним впливом дотичних і нормальних напружень. Пластична деформація, спричинена дотичними напруженнями, розрихлює (послаблює) матеріал, у той час як порушення його суцільності відбувається під впливом нормальних напружень розтягу [261].

Тому граничний стан матеріалу визначається його здатністю протидіяти дотичним і нормальним напруженням та характеризується критерієм виникнення тріщин $f_1(\tau_{kl})$ і критерієм їх поширення – нормальними напруженнями розтягу σ_1 за умови $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Критерії міцності при цьому описуються виразами [255]:

- умова опору зсуву

$$f_1(\tau_{kl}) \leq [a_1], \quad (2.8)$$

- умова опору порушення суцільності

$$f_2(\sigma_1) \leq [a_2], \quad (2.9)$$

де $f_1(\tau_{kl})$ – функція дотичних напружень; $f_2(\sigma_1)$ – функція максимальних нормальних напружень; $[m_1]$, $[m_2]$ – граничні значення констант матеріалу для заданих умов навантаження; $k, l = 1, 2, 3$.

При цьому ступінь відхилення напрямку σ_1 від найсприятливішого орієнтування відносно утворюваних тріщин визначається величиною розсіювання при випробуваннях матеріалу на міцність.

Еволюція дефектів у технологічні пошкодження та руйнування матеріалу підпорядковується умовам:

$$\begin{aligned}
 f_1(\tau_{kl}) &\leq [a_1]; \\
 f_1(\tau_{kl}) &> [a_1]; \\
 f_2(\sigma_{max}) &\leq [a_2]; \\
 f_2(\sigma_{max}) &> [a_2]
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Формування граничного стану матеріалу від зародження дефектів до відмови виробу через прогресування пошкоджень визначається досягненням граничних значень констант матеріалу для заданих умов навантаження.

У загальному випадку:

$$F(\tau_{kl}, \sigma_l, a_i) = 0. \tag{2.11}$$

У частковому випадку вираз (2.11) матиме вигляд [255]:

$$\sigma_i^b + a_1 \cdot \sigma_l^c \leq a_2. \tag{2.12}$$

що представляє об'єднаний критерій Писаренко-Лебедєва [255]:

- для структурно-однорідного матеріалу

$$\chi \cdot \sigma_i + (1 - \chi) \cdot \sigma_l \leq \sigma_{екв.}, \tag{2.13}$$

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

$$\chi = \frac{\sigma_p}{\sigma_c}, \tag{2.14}$$

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

- для структурно-неоднорідного матеріалу

$$\chi \cdot \sigma_i \cdot Q + (1 - \chi) \cdot \sigma_l \cdot P \leq \sigma_{екв.}, \tag{2.15}$$

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

Встановлено [223, 255], що 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 ($Q=1$). Функція P визначається за формулою [255]:

$$P = A_m^{l-I(\sigma)}, \tag{2.16}$$

де A_m – константа матеріалу, що залежить від характеру наявних дефектів;
 $I(\sigma)$ – функція напружень що визначає «жорсткість» навантаження

$$I(\sigma) = \frac{3 \cdot \sigma_0}{\sigma_i} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}. \quad (2.17)$$

Константа матеріалу A_m відображає статистичну сутність процесу пошкодження та руйнування матеріалу [255]:

$$A_m = \left(\frac{1-q}{q} \right)^\beta, \quad (2.18)$$

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

$$q = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{n} q_i, \quad (2.19)$$

Константа A_m визначається на підставі результатів випробувань матеріалу на міцність під час розтягу, стиску та кручення [223, 255]:

$$A_m = \frac{\sigma_{екв.} - \sqrt{3} \cdot \chi \cdot \tau_\kappa}{(1-\chi) \cdot \tau_\kappa}, \quad (2.20)$$

де τ_κ – границя міцності матеріалу при крученні.

Виходячи з умови еквівалентності ймовірностей крихкого руйнування згідно теорії Вейбулла [102] для згину та кручення, встановлено залежність для використання неруйнівних методів контролю стану матеріалу:

$$A_m = \left(\frac{m+2}{4m+4} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (2.21)$$

де m – коефіцієнт гомогенності у розподілі Вейбулла.

Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) у традиційних дослідженнях визначають за результатами випробування зразків різних розмірів або за формулами Гумбеля на підставі даних випробувань партії однакових зразків.

Застосування спрощеної формули

$$A_m = 1 - \frac{1}{m}, \quad (2.22)$$

отриманої розкладом функції $A_m = e^{-\frac{1}{m}}$ у степеневий ряд із врахуванням лише перших членів ряду, є недоцільним для $m \in [0;60]$ у практиці інженерних розрахунків через значні похибки у характеристиці граничних станів матеріалу виробу, що визначається малими значеннями коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) і значною неоднорідністю поверхневого шару внаслідок технологічних дефектів (рис. 2.5).

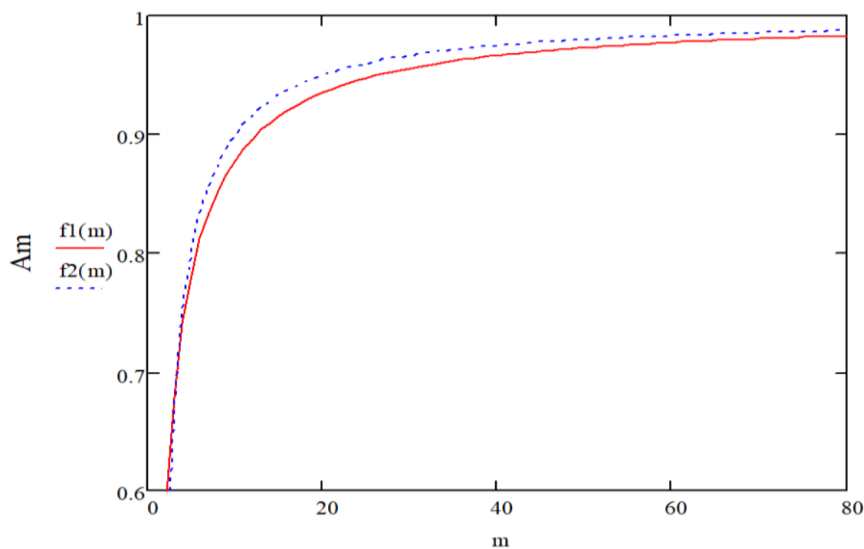


Рис. 2.5. Залежність константи матеріалу A_m від зміни коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m): $f1(m)$ – для узагальненої формули (2.21), $f2(m)$ – для спрощеної формули (2.22)

Оскільки матеріал поряд із параметрами визначеної поверхні виробу слугують носіями інформації про технологічне успадкування під час виготовлення виробу, то доцільно використати параметр гомогенності (однорідності) матеріалу для аналізу технологічного успадкування параметрів якості виробу за оцінкою деградації його властивостей. Зокрема, для виконавчих поверхонь об'єкту машинобудівного виробництва це реалізують за динамікою зміни коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), константи матеріалу A_m і/або технологічної пошкоджуваності D (рис. 2.4).

Структурну неоднорідність матеріалу відповідно до його фізико-механічних характеристик розглядають на макро-, мікро- та субмікрорівнях. При аналізі

фізичних процесів на макрорівні структурна неоднорідність матеріалу при виготовленні деталей машин визначається його хімічним складом, методом отримання та технологією формоутворення вхідної заготовки, наявністю макродефектів (включень, пор, раковин) після заготівельних операцій і технологічних обробок.

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 розглядуваного об'єкту 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.

При виготовленні машинобудівних виробів у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – вихідна деталь» за критерієм однорідності матеріалу реалізуються три варіанти технологічного успадковування властивостей матеріалу на макрорівні:

- 1) структурно-однорідний матеріал заготовки після реалізації ТП трансформується у структурно-однорідний матеріал готової деталі;
- 2) структурно-неоднорідний матеріал заготовки після реалізації ТП забезпечує структурно-неоднорідний матеріал готової деталі;
- 3) структурно-неоднорідний матеріал заготовки після зняття дефектного шару реалізації ТП забезпечує структурно-однорідний матеріал готової деталі.

Перший і другий варіанти забезпечують необхідні для умов експлуатації параметри якості виробу в процесі їхнього технологічного успадковування параметрів без зміни початкового стану матеріалу заготовки. При виготовленні машинобудівних виробів із використанням методів механічного оброблення, термооброблення та ППД поверхня вхідної заготовки, як правило, містить пори, раковини, домішки, що визначає структурну неоднорідність матеріалу поверхневого шару внаслідок заготівельних операцій і технологічних обробок. В процесі

реалізації принципу ФОП ТП для виконавчих поверхонь деталей машин в результаті технологічного успадковування властивостей від заготовки до деталі на технологічних переходах операцій забезпечується визначена експлуатаційними умовами структура деталі після зняття дефектного шару матеріалу, що реалізує третій варіант технологічного успадковування властивостей виробу.

Відповідно до положень теорії Качанова-Работнова, залежність (1.23) представлено у вигляді

$$\psi = \frac{d\tilde{A}}{dA}, \quad (2.23)$$

$$D = 1 - \psi = \frac{dA - d\tilde{A}}{dA} = \frac{dA_D}{dA}. \quad (2.24)$$

де dA , dA_D , $d\tilde{A}$ – відповідно загальна площа досліджуваної області матеріалу, площа матеріалу без пошкоджень і з пошкодженнями.

Структурно-чутливий параметр – коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) визначає ступінь деградації структури. Значення m , визначені для основного матеріалу (матриці), характеризуються високою однорідністю та низькою схильністю до пошкоджуваності, тобто $m_{matr.} \rightarrow 1$. Поряд з тим значення m у проміжних перерізах $0 \leq m \leq 1$.

Відповідно до формули (2.24) при реалізації методу LM-твердості зміну технологічної пошкоджуваності D визначають за розсіюванням характеристик твердості за Брінелем, Роквелом, Віккерсом при зміні коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) [221, 232-238]:

$$D = \frac{m_{matr.} - m_i}{m_{matr.}}, \quad (2.25)$$

де $m_{matr.}$, m_i – відповідно коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m), що характеризують розсіювання твердості основного матеріалу та в i -тому перерізі виробу.

Інтенсивність зростання технологічної пошкоджуваності j_D визначають за формулою:

$$j_D = \frac{m_{matr.} - m_i}{m_i}, \quad (2.26)$$

Технологічна пошкоджуваність D (2.25) інтерпретується як відношення різниці коефіцієнтів гомогенності Вейбулла основного матеріалу та в i -тому перерізі виробу, до коефіцієнта гомогенності Вейбулла основного матеріалу. У той же час інтенсивність зростання технологічної пошкоджуваності j_D (2.26) – це відношення різниці коефіцієнтів гомогенності Вейбулла основного матеріалу та в i -тому перерізі виробу, до коефіцієнта гомогенності Вейбулла в i -тому перерізі виробу.

При невідомому розподілі 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 (2.21). 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 і інтенсивністю її зростання j_D , визначених за формулами (2.25) і (2.26). При використанні коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) в якості критерія для оцінки ступеня деградації матеріалу встановлюють загальну тенденцію для оцінювання однорідності або пошкоджуваності матеріалів виробу. Однак, на відміну від константи матеріалу A_m (2.21), технологічної пошкоджуваності матеріалу D (2.25) і інтенсивності її зростання j_D (2.19), за зміною коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) складно порівнювати результати для різних матеріалів з огляду на відмінності у їхніх фізико-механічних властивостях, різних методах формоутворення та технологічних обробок.

2.2.2. Розроблення технологічного успадковування параметрів для принципів об'єктно- і функціонально-орієнтованого проєктування технологічних процесів

Для проєктованого технологічного процесу виготовлення виробу із отриманої вхідної заготовки (рис. 2.6) при реалізації i -тої технологічної операції ($i \in [1;n]$) технологічне успадковування параметрів визначає множину обмежень, які забезпечують вимоги точності оброблення, якості поверхневого шару, відхилення

форми та взаємного розташування поверхонь, характеристики матеріалу відповідно до технічних вимог конструкторсько-технологічної документації.

Вхідні параметри для заданого технологічного процесу виготовлення виробу $Y_{11} \dots Y_{1j^*}$ формуються із вихідних параметрів технологічного процесу виготовлення заготовки. Після виконання визначеної технологічної операції її вхідні параметри Y_{ij^*} за рахунок впливу технологічної системи верстат – пристрій – інструмент – заготовка і технологічного успадкування властивостей перетворюються у вихідні параметри X_{ij} (рис. 2.6). Ймовірність невідбракування заготовки деталі на i -тій технологічній операції за j -тим технологічним параметром $P(t)_{Y_{ij^*} \rightarrow X_{ij}}$ прогнозує отримання заданого параметра деталі у межах регламентованої технічними вимогами величини допуску.

Виконання умови $j^*=j$ або $j^* \neq j$ забезпечується регламентованими технологічними завданнями на визначеній технологічній операції.

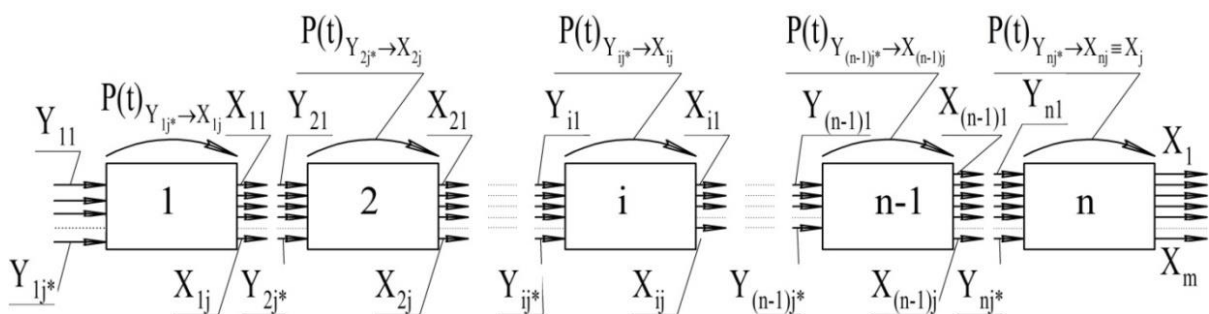


Рис. 2.6. Принципова схема технологічного процесу виготовлення виробу

При розв'язанні даної технологічної задачі прийнято, що вихідні параметри попередньої технологічної операції $X_{(i-1)j}$ перед виконанням поточної не зазнають змін. Тому справедливе припущення про тотожність вихідних параметрів попередньої технологічної операції і вхідних параметрів поточної технологічної операції: $X_{(i-1)j} \equiv Y_{ij^*}$.

Для принципу ООП визначена x -та поверхня виробу FS_x характеризується технологічним успадкуванням множини параметрів якості: точності оброблення, геометричних (відхилень форми та взаємного розташування поверхонь, хвилястості,

показників шорсткості та субмікрошорсткості) і фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару:

$$FS_x = \left\{ \begin{array}{l} \{TOP_{xl_as} \dots TOP_{xy_as}\} \rightarrow [TOP_{x_as}] \\ \{TOP_{xl_gp/macro} \dots TOP_{xm_gp/macro}\} \rightarrow [TOP_{x_gp/macro}] \\ \{TOP_{xl_gp/wav} \dots TOP_{xk_gp/wav}\} \rightarrow [TOP_{x_gp/wav}] \\ \{TOP_{xl_gp/micro} \dots TOP_{xl_gp/micro}\} \rightarrow [TOP_{x_gp/micro}] \\ \{TOP_{xl_gp/submicro} \dots TOP_{xp_gp/submicro}\} \rightarrow [TOP_{x_gp/submicro}] \\ \{TOP_{xl_fp} \dots TOP_{xr_fp}\} \rightarrow [TOP_{x_fp}] \end{array} \right\}, \quad (2.30)$$

де $\{TOP_{xl_as} \dots TOP_{xy_as}\}$, $\{TOP_{xl_gp/macro} \dots TOP_{xm_gp/macro}\}$,
 $\{TOP_{xl_gp/wav} \dots TOP_{xk_gp/wav}\}$, $\{TOP_{xl_gp/micro} \dots TOP_{xl_gp/micro}\}$,
 $\{TOP_{xl_gp/submicro} \dots TOP_{xp_gp/submicro}\}$, $\{TOP_{xl_fp} \dots TOP_{xr_fp}\}$ – сукупність
відповідно у параметрів точності, m параметрів відхилення форми та взаємного
розташування поверхонь, k параметрів хвилястості, l параметрів шорсткості, p
параметрів субмікрошорсткості, r фізико-механічних параметрів якості
поверхневого шару, що забезпечуються для x -тої функціональної поверхні;
 $[TOP_{x_as}]$, $[TOP_{x_gp/macro}]$, $[TOP_{x_gp/wav}]$, $[TOP_{x_gp/micro}]$, $[TOP_{x_gp/submicro}]$, $[TOP_{x_fp}]$ –
граничні (лімітуючі) значення відповідно показників точності, відхилення форми та
взаємного розташування поверхонь, хвилястості, шорсткості, субмікрошорсткості,
фізико-механічних параметрів якості поверхні.

Для вибору або розрахунків технологічних параметрів ТП використано
множину лімітуючих значень параметрів якості виробу або вибраний із множини
його граничний параметр якості для визначеної x -тої поверхні виробу:

$$\begin{array}{l} [TOP_{x_as}] [TOP_{x_gp/macro}] [TOP_{x_gp/wav}] [TOP_{x_gp/micro}] \\ [TOP_{x_gp/submicro}] [TOP_{x_fp}] \rightarrow [TOP_x] \end{array}. \quad (2.31)$$

Для принципу ФОП ТП із врахуванням гомогенності матеріалу як параметра
для аналізу технологічного успадковування параметрів якості вираз (2.30)
представлено у вигляді:

$$\left. \begin{array}{l}
\{TOP_{x1_as} \dots TOP_{xy_as}\} \rightarrow [TOP_{x_as}] \\
\{TOP_{x1_gp/macro} \dots TOP_{xm_gp/macro}\} \rightarrow [TOP_{x_gp/macro}] \\
\{TOP_{x1_gp/wav} \dots TOP_{xk_gp/wav}\} \rightarrow [TOP_{x_gp/wav}] \\
\{TOP_{x1_gp/micro} \dots TOP_{xl_gp/micro}\} \rightarrow [TOP_{x_gp/micro}] \\
\{TOP_{x1_gp/submicro} \dots TOP_{xp_gp/submicro}\} \rightarrow [TOP_{x_gp/submicro}] \\
\{TOP_{x1_fp} \dots TOP_{xr_fp}\} \rightarrow [TOP_{x_fp}]
\end{array} \right\} \rightarrow [TOP_x]$$

$$\Downarrow$$

$$\left. \begin{array}{l}
m_{x_0} \rightarrow m_{x_1} \rightarrow \dots m_{x_k} \rightarrow \dots \rightarrow m_{x_n}; \\
v_{x_0} \rightarrow v_{x_1} \rightarrow \dots v_{x_k} \rightarrow \dots \rightarrow v_{x_n}; \\
A_{x_0} \rightarrow A_{x_1} \rightarrow \dots A_{x_k} \rightarrow \dots \rightarrow A_{x_n}; \\
D_{x_0} \rightarrow D_{x_1} \rightarrow \dots D_{x_k} \rightarrow \dots \rightarrow D_{x_n}
\end{array} \right\}$$

де $k=1$ – заготовка; $k=1, \dots, n$ – методи обробки x -тої поверхні; $m_{x_0} \dots m_{x_n}$; $v_{x_0} \dots v_{x_n}$; $A_{x_0} \dots A_{x_n}$; $D_{x_0} \dots D_{x_n}$ – відповідно зміна коефіцієнта гомогенності Вейбулла, константи матеріалу та технологічної пошкоджуваності матеріалу виробу при обробленні його x -тої поверхні згідно раціонального маршруту її оброблення.

В процесі виготовлення машинобудівних виробів множина обмежень стосовно ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів та прогнозування браку на i -тій технологічній операції при реалізації принципу ООП ТП має вигляд:

$$\begin{aligned}
d(h)_{ie \min} &\leq d(h)_{ie} \leq d(h)_{ie \max}; \\
l_{if \min} &\leq l_{if} \leq l_{if \max}; \\
(D)(H)_{ig \min} &\leq (D)(H)_{ig} \leq (D)(H)_{ig \max}; \\
L_{ih \min} &\leq L_{ih} \leq L_{ih \max}; \\
Ra_{(e,f,g,h)} &\leq [Ra_{(e,f,g,h)}]
\end{aligned}
\tag{2.33}$$

де $d(h)_{ie}$, $(D)(H)_{ig}$, – відповідно отримуваний e -тий охоплюваний (зовнішній) діаметр/площина або g -тий охоплюючий (внутрішній) діаметр/площина, що формоутворюється на i -тій технологічній операції; l_{if} , L_{ih} – відповідно отримуваний f -тий лінійний розмір для характеристики охоплюваного (зовнішнього) діаметра/площини поверхні виробу або h -тий лінійний розмір для визначення охоплюючого (внутрішнього) діаметра/площини, що формоутворюється на i -тій

технологічній операції; $d(h)_{ie \min}$, $d(h)_{ie \max}$, $(D)(H)_{ig \min}$, $(D)(H)_{ig \max}$ – регламентовані технічними вимогами відповідно граничні значення e -того охоплюваного (зовнішнього) діаметра/площини та g -того охоплюючого (внутрішнього) діаметра/площини, що формуються на i -тій технологічній операції; $l_{if \min}$, $l_{if \max}$, $L_{if \max}$, $L_{ig \max}$ – регламентовані технічними вимогами відповідно граничні значення отриманого f -того лінійного розміру для характеристики охоплюваного (зовнішнього) діаметра/площини поверхні виробу або h -того лінійного розміру для визначення охоплюючого (внутрішнього) діаметра/площини, що формуються на i -тій технологічній операції; $Ra_{i(e,f,g,h)}$, $[Ra_{i(e,f,g,h)}]$ – відповідно отримане та регламентоване технічними вимогами середньо арифметичне відхилення профіля визначеної поверхні виробу, що формуються на i -тій технологічній операції.

На етапі конструювання виробу стадії його розроблення вибирається матеріал заготовки, визначаються номінальні значення діаметральних і лінійних розмірів, призначаються посадки для спряжених поверхонь і формуються технічні вимоги на виготовлення.

Номінальні розміри спряжень і вільних розмірів для множини $\{TOP_{x1_as} \dots TOP_{xy_as}\}$ обчислюють розрахунком деталей на міцність і твердість, а також виходячи з досконалості геометричних форм і забезпечення технології конструювання виробів.

Відхилення форми та взаємного розташування поверхонь $\{TOP_{x1_gp/macro} \dots TOP_{xm_gp/macro}\}$ визначають у процесі розрахунку розмірних ланцюгів для складальної одиниці, в яку входить дана деталь, що визначають відносно положення виконавчих поверхонь та конструкторських основних баз виробу (деталі).

Параметри хвилястості $\{TOP_{x1_gp/wav} \dots TOP_{xk_gp/wav}\}$, субмікрошорсткості $\{TOP_{x1_gp/submicro} \dots TOP_{xp_gp/submicro}\}$ і фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару $\{TOP_{x1_fp} \dots TOP_{xr_fp}\}$ призначають для поверхонь, зокрема для виконавчих, деталі для забезпечення її експлуатаційних характеристик і

показників надійності.

Параметри шорсткості $\{Top_{xl_gp/micro} \dots Top_{xl_gp/micro}\}$ узгоджуються із параметрами точності або призначаються для забезпечення її експлуатаційних характеристик і показників надійності.

Для принципу ФОП ТП 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:

$$\left. \begin{array}{l} m_{x_0} < m_{x_1} < \dots m_{x_k} < \dots < m_{x_n} \rightarrow \infty; \\ v_{x_0} > v_{x_1} > \dots v_{x_k} > \dots > v_{x_n} \rightarrow 0 \\ A_{x_0} < A_{x_1} < \dots A_{x_k} < \dots < A_{x_n} \rightarrow I; \\ D_{x_0} > D_{x_1} > \dots D_{x_k} > \dots > D_{x_n} \rightarrow 0; \end{array} \right\}, \quad (2.34)$$

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.

Коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m) і пов'язані з ним константа матеріалу A_m , технологічна пошкоджуваність матеріалу виробу D і інтенсивність зростання технологічної пошкоджуваності j_D при обробленні виконавчої поверхні згідно раціонального маршруту її оброблення визначаються за результатами оброблення дослідних зразків (зразків-свідків) або вибираються із бази даних (БД).

2.3. Розроблення структури та методичного забезпечення системи аналізу формоутворення виробу в умовах самоорганізації технологічних систем

Теоретичні підходи, методи комп'ютерного моделювання й статистичного оброблення та аналізу експлуатаційної інформації з дослідженням фізики відмов та розробленням методів забезпечення експлуатаційних характеристик і показників

надійності виробів реалізуються з єдиних синергетичних позицій для оцінки спонтанного формування структур та їхньої поведінки з позиції успадковування властивостей [193, 200].

При реалізації технологічного процесу виготовлення виробу технологічна операція є підсистемою технологічного процесу, проте технологічний перехід є підсистемою в межах визначеної технологічної операції.

В умовах синергетичного підходу прогнозування динамічного розвитку (еволюції) системи у часі τ здійснюють шляхом зміни множини зовнішніх параметрів керування ζ , що діють на систему. Опис складних систем забезпечується вектором стану $q \in [q_1, q_1, \dots, q_n]$, де q_1, q_1, \dots, q_n – змінні стану, що відповідають множині підсистем [193].

Основне рівняння стану еволюційних систем представлено у вигляді [193, 299]:

$$q = F(\zeta, q, \nabla, x, \tau), \quad (2.35)$$

де x – просторові координати; ∇ – оператор $(\frac{\partial}{\partial x}; \frac{\partial}{\partial y}; \frac{\partial}{\partial z})$.

За умови неявного зв'язку F від часу (автономності системи) та нехтуючи залежністю від просторових координат, рівняння (2.35) перетворено до вигляду [214]:

$$q = F(\zeta, q(\tau)), \quad (2.36)$$

Для практичного використання синергетичного підходу адекватно вибирають параметри стану q досліджуваної системи та параметри керування ζ на підставі дослідження поведінки системи під дією зовнішніх факторів [193].

Загальні закони організації та розвитку систем підлягають системному функціонально-морфологічно-інформаційному аналізу, на підставі дослідження взаємозв'язків і взаємовпливів функціонального, морфологічного та інформаційного опису [160, 203].

Функціональний опис системи задається вісьмома важливими параметрами [193]:

$$S_F = \{T, x, C, W, y, Y, \phi, \eta\}, \quad (2.37)$$

де T – множина періодів часу; x – множина миттєвих значень вхідних (початкових) впливів; $C = \{c: T \rightarrow x\}$ – множина допустимих вхідних впливів; W – множина станів; y – множина миттєвих значень вихідних (кінцевих) впливів; $Y = \{u: T \rightarrow y\}$ – множина вихідних величин; $\eta = \{T \times T \times T \times c \rightarrow W\}$ – перехідна функція стану; $T \times W \rightarrow y$ – вихідне відображення; c – відрізок вхідного впливу; u – відрізок в вихідній величині.

При охопленні широкого діапазону властивостей системи при застосуванні залежності (2.37) виникають складнощі у її інтерпретації та практичному застосуванні за необхідності забезпечення параметрів, процесів та ієрархії технічної системи за допомогою її функціонального опису [124, 193].

Загальна ефективність системи визначається вектором функціоналом [193]:

$$E = \{E_s\}, \quad (2.38)$$

$$E_s = E_s(\psi_s) = E_s(F_1^{(1)}, F_2^{(1)}, \dots, F_n^{(1)}) = E_s(\{F_i^{(1)}\}), \quad i = \overline{1, n}; s = \overline{1, N}, \quad (2.39)$$

де ψ_s, F_i – відповідно множини функцій системи та процесів, що їх реалізують.

Раціональний шлях формування функціонального опису полягає у застосуванні багаторівневої ієрархії інформаційного забезпечення, при якій опис вищого рівня забезпечуватиметься узагальненими та факторизованими змінними нижчого рівня. Ієрархія створюється порівневою факторизацією процесів $\{F_i\}$ за допомогою узагальнених параметрів $\{Q_j\}$, що є функціоналами $\{F_i\}$ при кількості параметрів, значно меншій числа змінних [193, 312].

Вся ієрархія класів систем, що забезпечує поступове нарощування інформативності, будується на основі технології [18, 200]. Процеси першого рівня $\{F_i^{(1)}\}$ (процеси взаємодії із середовищем), що отримують на виході системи, описуються параметрами системи першого рівня $\{Q_j^{(1)}\}$ при $j = \overline{1, m}$, активними протидіючими параметрами середовища $\{b_k\}$ при $k = \overline{1, K}$, нейтральними (випадковими) параметрами середовища $\{c_l\}$ при $l = \overline{1, L}$, сприятливими параметрами середовища $\{d_p\}$ при $p = \overline{1, P}$ [193].

Варіації ефективності системи відносно параметрів середовища та відповідні похідні визначаються за формулами [193, 299]:

$$\begin{aligned} \delta \tilde{E}_s(b_k) < 0, \quad \frac{\partial \tilde{E}_s}{\partial b_k} < 0, \quad k = \overline{1, K}; \\ \delta \tilde{E}_s(c_l) < 0, \quad \frac{\partial \tilde{E}_s}{\partial c_l} = 0, \quad l = \overline{1, L}; \\ \delta \tilde{E}_s(d_p) < 0, \quad \frac{\partial \tilde{E}_s}{\partial d_{pl}} > 0, \quad p = \overline{1, P}, \end{aligned} \quad (2.40)$$

де знак \sim означає усереднення.

Формується наступна ієрархія опису з позиції технологічного успадкування властивостей [124, 193]: ефективність (кінцева множина функціоналів) – параметри першого рівня (функціонали) – процеси другого рівня (функції) – параметри другого рівня (функціонали) тощо.

Зовнішні характеристики системи визначаються верхнім рівнем ієрархії, тому часто обмежуються описами виду $\{E_i\}$, $\{\psi_s\}$, $\{Q_j^{(i)}\}$, $\{b_k\}$, $\{c_l\}$, $\{d_p\}$. Число рівнів ієрархії визначається регламентованою точністю вихідних параметрів [188, 193].

За умови $E=E(Q^{(1)})$, $Q^{(1)}=Q^{(1)}(b, c, d)$ залежність (2.37) трансформується у вираз:

$$S_F = \{Q^{(1)}(t), Q^{(2)}(t), \dots, Q^{(\gamma)}(t)\}. \quad (2.41)$$

Поточний стан системи залежить від попереднього і визначається процесами успадкування властивостей, що описуються диференційними рівняннями виду [124, 193]:

$$\begin{aligned} \varphi^{(\gamma)}[O^{(\gamma)}(t), O^{(\gamma)}(t-\tau); \frac{dO^{(\gamma)}(t-\tau)}{dt}, \dots, \frac{d^i O^{(\gamma)}(t-\tau)}{dt^i}, \dots, \frac{d^n O^{(\gamma)}(t-\tau)}{dt^n}, \dots, \\ \int_{t_1}^t O^{(\gamma)}(\xi) dG_l^{(\gamma)}(\xi, t), \dots, \int_{t_k}^t O^{(\gamma)}(\xi) dG_k^{(\gamma)}(\xi, t)] \end{aligned} \quad (2.42)$$

де $\varphi^{(\gamma)}$, $G_k^{(\gamma)}$ – деякі функції; $S_F = \{O^{(1)}(t), O^{(2)}(t), \dots, O^{(\gamma)}(t)\}$ – функціональний опис системи; $O^{(1)} = O^{(1)}(b, c, d, \dots)$ – виходи системи; (b, c, d, \dots) – її входи.

Морфологічний опис системи задається чотирма важливими параметрами [193, 259]:

$$S_M = \{ \Sigma, V, \sigma, K \}, \quad (2.43)$$

де $\Sigma = [\Sigma_i]$ – множина елементів і їх властивостей; $V = [V_j]$ – множина зв'язків; σ – структура; K – композиція (табл. 2.1).

Функціональний і морфологічний описи формуються відповідно до ієрархічного принципу шляхом декомпозиції підсистем, які повинні співпадати [124, 193].

Функціональний опис α -го рівня [193]:

$${}_{\alpha}S_F = \{ {}_{\alpha}T, {}_{\alpha}x, {}_{\alpha}C, {}_{\alpha}W, {}_{\alpha}y, {}_{\alpha}Y, {}_{\alpha}\varphi, {}_{\alpha}\eta \} = \bigcup_i {}_{\alpha+1}S_{F_i}. \quad (2.44)$$

Морфологічний опис χ -го рівня [193]:

$${}_{\chi}S_M = \{ {}_{\chi}\Sigma, {}_{\chi}V, {}_{\chi}\sigma, {}_{\chi}K \} = \bigcup_i {}_{\chi+1}S_{M_i}. \quad (2.45)$$

Таблиця 2.1

Класифікація критеріїв морфологічного опису системи [303]

| Множина елементів і їх властивостей | | Множина зв'язків | | Структура | |
|---|---|---|-----------------------------------|--|--|
| Склад | Властивості елементів | Призначення зв'язків | Характер зв'язків | Стійкість | Побудова |
| гомогенний, гетерогенний, змішаний, невизначений | інформаційні, енергетичні, інформаційно-енергетичні, матеріально-енергетичні, невизначені | інформаційні, матеріальні, енергетичні, | прямі, зворотні, нейтральні | детермінована, ймовірнісна, хаотична | ієрархічна, багатозв'язкова, змішана, перетворювана |

Морфологічні властивості системи вказують одним або комбінацією верхніх індексів [124, 193]:

$$S_M = \{ \Sigma^{(k)}, V^{(m)}, \sigma^{(n)}, {}_{\chi}K^{(l)} \}, \quad k = \overline{1,4}, m = \overline{1,5}, n = \overline{1,4}, l = \overline{1,6}, \dots \quad (2.46)$$

Функціональні процеси у системі безпосередньо пов'язані з інформаційними, при цьому джерелом інформації для її функціонування є внутрішній ресурс і

середовище, а носієм – речовина (морфологічна інформація) та енергія. Внутрішня енергія характеризує еволюцію, цілі та діяльність системи [124, 125].

З позиції адитивності інформації I для множини R_0 N незалежних рівноймовірних реалізацій системи $R_0 \in [R_{01}; R_{0N}]$ функціональна залежність [188, 193]:

$$I\left(\prod_{i=1}^N R_{0i}\right) = I(R_{01}) + \dots + I(R_{0N}) \quad (2.47)$$

має єдиний розв'язок [188]:

$$I = K \ln(R_0), \quad (2.48)$$

де $K = \log_b(e)$ – константа; індекс b описує індивідуальні особливості частин або підсистем [193]; $b=2$ при вираженні інформації в бітах [188, 193].

Кількісною характеристикою при еволюції інформаційних потоків служить інформація на один символ i [188, 193]:

$$i = -K \sum_{j=1}^k p_j \cdot \ln(p_j), \quad (2.49)$$

де p_j – ймовірність j -того стану системи із k можливих.

Сумарна інформація, що характеризує перехід з одного стану системи в інший за умови безпосереднього взаємозв'язку між невизначеністю стану об'єкта та його фізичними властивостями [193]:

$$I = -k \cdot \sum_{j=1}^k p_i \cdot \log_b(p_i). \quad (2.50)$$

Взаємозв'язки між причинами та діями у системі описуються рівняннями виду $\dot{q} = F_0(q(t); t)$ [188]:

$$\dot{q} = -\gamma \cdot q + F(t), \quad (2.51)$$

де q – параметр, що описує дію; γ – функція згасання; $F(t)$ – функція, що визначає зовнішній силовий вплив.

Розв'язок (2.51) представляє собою відклик системи на прикладене зусилля $F(\tau)$ [188]:

$$q = \int_0^t e^{-\gamma(t-\tau)} F(\tau) d\tau. \quad (2.52)$$

Значення q у визначений момент часу t залежить, крім впливів у даний момент часу, також і від успадковування подій у попередні моменти часу.

Для множини підсистем q_μ , елементи яких зв'язані через коефіцієнти впливу від зовнішніх сил F_n , представлено рівняння (2.52) у матричній формі [188]:

$$\dot{q}_\mu = Aq_\mu + B(F)q_\mu + C(F), \quad (2.53)$$

де A, B – незалежні від q_μ матриці.

При ототожненні для умов самоорганізації зовнішні сили із частинами власне системи ($F \rightarrow q_1, q \rightarrow q_2$), отримано дві підсистеми [188]:

$$\dot{q}_1 = -\gamma_1 \cdot q_1 - a \cdot q_1 \cdot q_2, \quad (2.54)$$

$$\dot{q}_2 = -\gamma_2 \cdot q_2 + b \cdot q_1^2 \quad (2.55)$$

за наявності адіабатичного наближення [193]:

$$\gamma_2 \geq \gamma_1 \quad (2.56)$$

при $\dot{q}_2 = 0$ отримано розв'язок [188]:

$$q_2(t) \approx \gamma_2^{-1} \cdot b \cdot q_1^2(t) \quad (2.57)$$

Після підстановки (2.54) в (2.56), визначено:

$$\dot{q}_1 = -\gamma_1 \cdot q_1 - \frac{a \cdot b}{\gamma_2} \cdot q_1^3. \quad (2.58)$$

Розв'язки рівняння (2.58) при $\gamma_1 > 0$ і $\gamma_1 < 0$ є різними [188]:

- при $\gamma_1 > 0$ і $\frac{a \cdot b}{\gamma_2} > 0$ отримано стійкий розв'язок $q_1 = 0$;

- при $\gamma_1 < 0$ і $\frac{a \cdot b}{\gamma_2} > 0$ отримано нестійкий розв'язок $q_1 = 0$ і два стійких розв'язки

$\pm \sqrt{\gamma_1 / \left(\frac{a \cdot b}{\gamma_2} \right)}$, причому згідно (2.57) $q_2 \neq 0$.

У даному випадку проявляються два основних синергетичних поняття: замість великого числа змінних для різних q достатньо розглянути лише одне рівняння для

q_1 , а потім згідно принципу підпорядкування виразити q через q_1 . У такому випадку q_1 є параметрами порядку – модами, які визначають ступінь впорядкованості системи та підпорядковують собі інші підсистеми [188, 193].

Встановлено [188, 193], що частина підсистем $q_j = q^{(var)} \in (j=1 \dots m)$ відповідає нестійким модам, а інша – $q_j = q^{(s)} \in (j=m+1 \dots k;)$ – підпорядковується стійким.

При переведенні систем внаслідок самоорганізації у стан $q^{(s)}$ вплив флуктуацій та оптимізаційних критеріїв спричинює їх еволюцію, причому величина флуктуації параметра порядку має вирішальне значення на характер функціонування систем [188].

В самоорганізованих системах керування їх адаптивністю та надійністю здійснюється умовами формування та величинами флуктуацій за рахунок зміни кількості підсистем [188, 193]. При адитивності величини повного виходу для підпорядкованим стійким модам інформаційним підсистемам, що підпорядковуються стійким модам з фіксованим параметром порядку, отримаємо:

$$q^{(s)} = q_d^{(s)} + q_r^{(s)}, \quad (2.59)$$

де $q_d^{(s)}$, $q_r^{(s)}$ – відповідно чітко визначений детермінований і флуктуючий (з розсіяними характеристиками) входи.

Загальна величина виходу при цьому [193]:

$$q_\Sigma = \sum_s q^{(s)} = \sum_{j=m+1}^k q_j. \quad (2.60)$$

Для множини взаємно незалежних випадкових величин $q^{(s)}$ із однаковим розподілом ймовірностей при визначеності середнього значення M і дисперсії σ^2 для кожного q_j сума q_Σ при $j \geq 1$ також є випадковою змінною. Відповідно до граничної центральної теореми для взаємно незалежних випадкових змінних залежності для середнього значення $E(q_\Sigma)$ і дисперсії мають вигляд [193]:

$$E(q_\Sigma) = s \cdot M. \quad (2.61)$$

$$\sigma^2(q_\Sigma) = s \cdot \sigma^2. \quad (2.62)$$

де $M = \frac{1}{k - (m + 1)} \sum_{j=m+1}^k q_j.$

Центральна гранична теорема розподілу ймовірності нової випадкової змінної Y_s для граничного випадку $s \rightarrow \infty$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(a < Y_s \leq b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\xi^2/2} d\xi, \quad (2.63)$$

де $Y_s = \frac{q_\Sigma - s \cdot M}{\sigma \cdot \sqrt{s}}$.

При $a=x$ і $b=x+dx$ в укрупненому наближенні

$$P(x_1 \sigma \sqrt{s} < (q_\Sigma - s \cdot M < x_2 \sigma \sqrt{s}) \approx \Phi(x_2) - \Phi(x_1), \quad (2.64)$$

де

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\xi^2/2} d\xi. \quad (2.65)$$

Постійна складова величини q_Σ в (2.60) збільшується пропорційно до числа підсистем (s) або реалізуючих їх характеристик і критеріїв, при цьому флуктуації зростають лише як \sqrt{s} . Поблизу точки виникнення нестійкості за рахунок істотної відмінності стійкі моди підлаштовуються під нестійкі і можуть бути виключені, що приводить до упорядкування системи за рахунок значного зменшення ступенів вільності [188, 193].

В самоорганізованих системах механічного оброблення та складання керування їхньою адаптивністю та надійністю здійснюється умовами формування та величинами флуктуацій за рахунок зміни кількості підсистем, їхніх параметрів або критеріїв. У зв'язку з цим технологічне забезпечення регламентованих показників якості виробів відповідно до необхідних експлуатаційних характеристик і показників надійності реалізовується обмеженою кількістю раціональних варіантів взаємодій виробу із технологічним середовищем «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» при застосуванні обмеженої кількості підсистем різних ієрархічних рівнів інтегрованої системи КТПВ.

Тому для ефективного проєктування функціонального-орієнтованого (гібридного) ТП при реалізації принципу ФОП традиційна автоматизована система аналізу формоутворення виробу потребує удосконалення.

На рис. 2.7 приведено структуру і методичне забезпечення PSPAS-системи (Product Shaping/Processing Analysis System – система аналізу формоутворення виробу), що використовується як складова САФ-системи або незалежний елемент у структурі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. На відміну від САФ-системи у PSPAS-системі, крім обробки різанням, обробки тиском (пластичного деформування), модифікування поверхневого шару та складання, враховується технологічне успадковування параметрів якості машинобудівного виробу. Підсистема аналізу технологічного успадковування при формоутворенні виробу (PSPAS-TI (Technological Inheritability Subsystem of PSPAS)) є визначальною та пріоритетною у PSPAS-системі, оскільки технологічне успадковування властивостей характеризує і процеси механічної обробки та обробки тиском, і модифікування поверхні термообробкою чи нанесенням покриття, і ТП складання. PSPAS-TI-підсистема містить підсистему аналізу технологічного успадковування за характеристиками матеріалу виробу (PSPAS-TIM (PSPAS – Technological Inheritability using Material parameters)) і за параметрами якості поверхневого шару (PSPAS-TIS (PSPAS – Technological Inheritability using Surface parameters)). Дослідження технологічного успадковування параметрів якості виробів за критерієм однорідності його матеріалу здійснюється розробленням взаємозв'язків та встановленням закономірностей у підсистемах аналізу гомогенності матеріалу вхідної заготовки (PSPAS-TIHMB (PSPAS – Technological Inheritability using Homogeneity of Material parameters of Blank) і гомогенності матеріалу при формоутворенні заготовки виробу (PSPAS-TIHMW (PSPAS – Subsystem of Technological Inheritability using Homogeneity of Material parameters during Workpiece Forming) (рис. 2.7).

Застосування комбінованих технологій при реалізації принципу ФОП ТП на стадії розроблення деталей машин у їхніх життєвих циклах забезпечується поєднанням раціональних варіантів простих методів технологічних впливів. Зокрема, різновиди методів вібраційних технологій передбачають оброблення виконавчих поверхонь не лише сталевими кульками, а й твердосплавними елементами, що забезпечують модифікування поверхневого шару із формуванням

необхідних експлуатаційних характеристик (зокрема, зносостійкості), регламентованих показників безвідмовності (наприклад, ймовірності безвідмовної роботи, гамма-відсоткового напрацювання до відмови тощо) і довговічності (ресурсу).

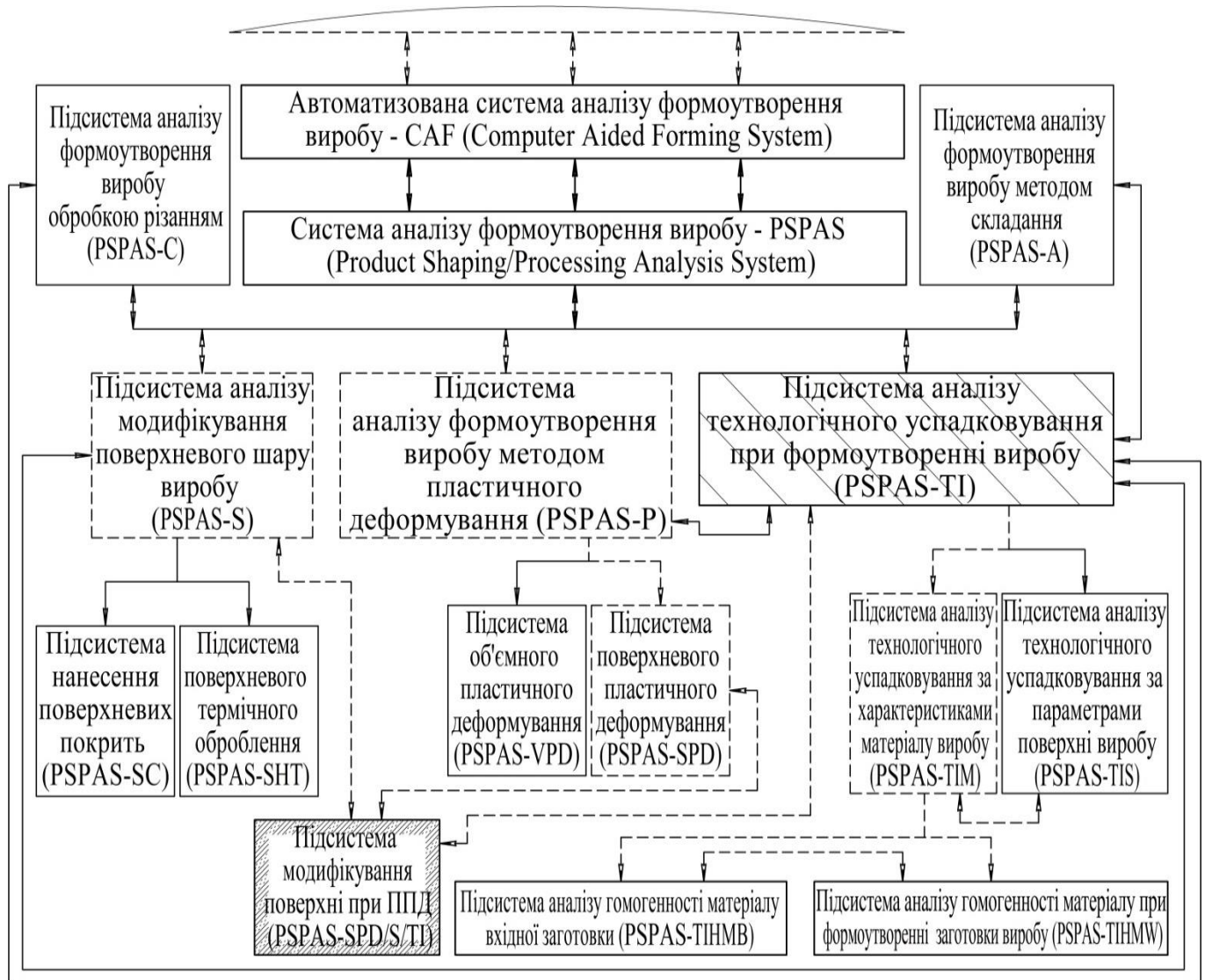


Рис. 2.7. Структура та методичне забезпечення системи аналізу формоутворення машинобудівного виробу (PSPAS – системи)

Крім цього враховується модифікування поверхні при ППД, що має місце при обробленні тиском із застосуванням твердосплавного середовища. У розробленій класифікації систем формоутворення виробу (рис. 2.7) це враховується розробленням взаємозв'язків та закономірностей у підсистемі модифікування

поверхні при поверхневому пластичному деформуванні (PSPAS-SPD/S/TI (PSPAS – Subsystem combining Surface Plastic Deformation, Surface treatment and Technological Inheritability)).

Реалізація САF-системи із використанням принципу ФОП ТП під час виготовлення машинобудівних виробів, в процесі розроблення взаємозв'язків і встановлення закономірностей забезпечується як реологічним імітаційним моделюванням процесу формоутворення за допомогою програмних комплексів DEFORM, Abaqus, AdvantEdge, LS-DYNA тощо, так і проведенням статистичного опрацювання результатів експериментальних досліджень і поєднання математичного моделювання з теоретико-експериментальними та моделюванням ТП у PSPAS – системі.

У даній дисертаційній роботі досліджуються взаємозв'язки та закономірності при реалізації підсистем аналізу гомогенності матеріалу вхідної заготовки (PSPAS-TIHMB) і аналізу гомогенності матеріалу при формоутворенні заготовки виробу (PSPAS-TIHMW), що характеризують підсистему аналізу технологічного успадковування за характеристиками матеріалу виробу (PSPAS-TIM) як складового елемента підсистеми аналізу технологічного успадковування при формоутворенні виробу (PSPAS-TI). Також досліджуються взаємозв'язки та визначаються закономірності при реалізації підсистеми модифікування поверхні при ППД (PSPAS-SPD/S/TI), що формується внаслідок взаємозв'язків підсистеми ППД (PSPAS-SPD) як складового елемента підсистеми аналізу формоутворення виробу методом пластичного деформування, підсистеми аналізу модифікування поверхневого шару виробу (PSPAS-S) і підсистеми аналізу технологічного успадковування під час формоутворення виробу (PSPAS-TI).

2.4. Дослідження критерію однорідності матеріалу для аналізу процесів технологічного успадковування параметрів якості виробів для принципу функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів

В процесі механічного оброблення вільних, неспряжених поверхонь машинобудівних виробів раціональна структура технологічних маршрутів їхнього

оброблення формується згідно принципу об'єктно-орієнтованого проєктування ТП та забезпечується множиною методів оброблення із дотриманням регламентованих вимог до точності та якості поверхневого шару за мінімальної технологічної собівартості. Методи оброблення вибирають з урахуванням способу отримання, габаритних розмірів та точності заготовки, властивостей матеріалу, технічного стану технологічного обладнання тощо [193, 203].

Для виконавчих, спряжених поверхонь машинобудівних виробів раціональна структура технологічних маршрутів їхнього оброблення формується згідно принципу функціонально-орієнтованого проєктування ТП при забезпеченні необхідних експлуатаційних характеристик виробів із дотриманням регламентованих вимог до точності та якості поверхневого шару [203].

У практиці машинобудування застосовують два варіанти вибору раціонального маршруту оброблення поверхонь виробу [203].

Перший варіант базується на забезпеченні технічних вимог щодо точності та якості виконавчих поверхонь із використанням типових планів їхньої обробки. Такий спосіб вибору маршруту оброблення виконавчих поверхонь є укрупненим, вимагає високої кваліфікації технолога та не враховує умови подальшої експлуатації для конкретного виробу [203]. Перший варіант реалізується при попередньому розрахунку типу виробництва та форми його організації.

Розрахунковий метод визначення маршруту оброблення поверхонь ґрунтується на обчисленні загального уточнення. Можливі методи оброблення поверхонь встановлюють за коефіцієнтом уточнення ε_{yi} , що враховує успадковування властивостей виробу від попереднього до поточного технологічного переходу [203]:

$$\varepsilon_{yi} = \frac{[TOP_{i-1}]}{[TOP_i]}, \quad (2.66)$$

де $[TOP_{i-1}]$, $[TOP_i]$ – значення лімітуючого параметра технологічної операції для визначеної поверхні виробу, що підлягає механічному обробленню, відповідно на попередньому та поточному технологічному переході.

У машинобудівній практиці найчастіше критерієм оцінки розрахункового уточнення є забезпечувана точність оброблення визначеної поверхні виробу [203]:

$$\varepsilon_{yi} = \frac{T_{i-1}}{T_i}, \quad (2.67)$$

де T_{i-1} , T_i – відповідно допуск забезпечуваного розміру на попередньому та поточному технологічних переходах.

Розрахункове уточнення ε_p обчислюється за граничним критерієм точності за формулою [203]:

$$\varepsilon_p = \frac{T_{заг.}}{T_{дет.}}, \quad (2.68)$$

де $T_{заг.}$ – допуск заготовки для показників точності вибраного методу отримання заготовки деталі; $T_{дет.}$ – допуск деталі згідно вимог конструкторської документації.

Кількість методів технологічних обробок n розраховується за формулою [203]:

$$n = \frac{\lg(\varepsilon_p)}{0,46} \quad (2.69)$$

де ε_p – розрахункове уточнення.

Перевірка правильності вибору n технологічних обробок визначається нерівністю:

$$\prod_{i=1}^n \varepsilon_i \geq \varepsilon_p. \quad (2.70)$$

Регламентована конструктором точність поверхонь виробів повинна узгоджуватися із параметрами шорсткості Rz [193].

Проте для деяких деталей ставлять вищі вимоги до якості поверхневого шару виконавчих поверхонь деталей машин, ніж до забезпечуваної точності.

У цьому випадку критерієм оцінки розрахункового уточнення є регламентоване конструкторською документацією середнє арифметичне відхилення профіля виконавчої поверхні виробу [203]:

$$\varepsilon_{yi} = \frac{Ra(Rz)_{i-1}}{Ra(Rz)_i}, \quad (2.71)$$

де $Ra(Rz)_{i-1}$, $Ra(Rz)_i$ – відповідно параметри шорсткості поверхні Ra або Rz на попередньому та поточному технологічних переходах.

Розрахункове уточнення ε_p обчислюється за формулою [203]:

$$\varepsilon_p = \frac{Ra(Rz)_{заг.}}{Ra(Rz)_{дет.}}, \quad (2.72)$$

де $Ra(Rz)_{заг.}$ – відповідно шорсткість поверхні заготовки та деталі за параметром $Ra(Rz)$.

Для певної групи виробів є особливо важливим забезпечення експлуатаційних характеристик їхніх функціональних поверхонь з огляду на катастрофічні наслідки їхніх відмов в процесі експлуатації. Тому системний принцип забезпечення життєвого циклу таких деталей і машин вимагає врахування на етапі технологічної підготовки виробництва відповідно до експлуатаційних умов показники зносостійкості, втомної міцності тощо, які визначаються регламентованими параметрами надійності, зокрема безвідмовності та довговічності [24, 25].

В процесі механічного оброблення заготовки після кожного технологічного переходу знімається шар металу – припуск, що містить комплексну інформацію про якість поверхневого шару, величину дефектного шару металу, що знімається, сукупне відхилення форми та взаємного розташування поверхонь та похибку оброблення.

Мінімальне значення припуску матеріалу заготовки, що видаляється при обробці різанням, визначають [193]:

- для послідовної обробки протилежних поверхонь (односторонній припуск):

$$z_{\min i} = R_{Z i-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (2.73)$$

- для паралельної обробки протилежних поверхонь (двосторонній припуск):

$$2z_{\min i} = 2 \cdot [R_{Z i-1} + T_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i], \quad (2.74)$$

- для обробки зовнішніх (внутрішніх) циліндричних поверхонь деталі (двосторонній припуск):

$$2z_{\min i} = 2 \cdot \left[R_{Z_{i-1}} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \right], \quad (2.75)$$

де $R_{Z_{i-1}}$ – шорсткість, досягнута на попередньому переході, мкм (мм); T_{i-1} – глибина дефектного шару, який отримана на попередньому переході, мкм (мм); ρ_{i-1} – просторове відхилення заготовки, отримане на попередньому переході, мкм, (мм); ε_i – похибка встановлення на виконуваному технологічному переході, мкм (мм).

Як в процесі формування основних характеристик матеріалу деталей машин, так і в процесі зняття поверхневого шару виробів важливе значення відіграє інформація про успадковування їхніх властивостей, що представляє собою множину показників якості продукції [24, 28].

Дослідження процесу технологічного успадковування властивостей матеріалу і параметрів якості виробів сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик і забезпечення показників надійності деталей машин за умови встановлення причин фізичних явищ і можливостей керування технологічними процесами операцій ТП під час виготовлення виробів [32-35].

Математичні залежності (2.73)–(2.75) описують процеси технологічного успадковування кількісних показників виробу, зокрема, допусків виробів, параметрів якості поверхонь тощо. У той же час основним носієм інформації про успадковування властивостей поряд із множиною параметрів оброблюваних поверхонь є матеріал оброблюваної заготовки [193].

Під впливом технологічних факторів при виготовленні виробів параметри матеріалу змінюється, причому при використанні методу ЛМ-твердості процес зміни контролюють не за абсолютним значенням зміни механічних характеристик матеріалу, а за їхнім розсіюванням.

Встановлено, що при відомих значеннях розсіювання характеристик твердості матеріалу розрахункове уточнення ε_p обчислюється за формулою [203]:

$$\varepsilon_p = \frac{m_{\text{дем.}}}{m_{\text{заг.}}}, \quad (2.76)$$

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

Уточнення для i -того технологічного переходу при відомих значеннях розсіювання характеристик твердості матеріалу представлено математичною залежністю:

$$\varepsilon_{yi} = \frac{m_i}{m_{i-1}}, \quad (2.77)$$

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

На підставі проведених досліджень встановлено критерій однорідності матеріалу, який характеризується гомогенністю матеріалу, як параметром для аналізу технологічного успадкування характеристик оброблюваних поверхонь виробу, та описується показниками: коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m), константою матеріалу A_m , технологічною пошкоджуваністю D і швидкістю її зростання j_D і уточненнями по технологічних переходах механічного оброблення деталей машин ε_i (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Структура критерію однорідності матеріалу

У загальному випадку критерій однорідності матеріалу (КОМ) для аналізу технологічного успадкування параметрів якості деталей при їхньому виготовленні методами різання, пластичного деформування та контролі властивостей

поверхневого шару методом ЛМ-твердості, який визначається сукупністю показників для кожного технологічного переходу, представлено у вигляді:

– для технологічного переходу при технологічному успадкуванні властивостей

$$\begin{aligned} KOM \in [m = f(H_1, H_2, \dots); v = f(H_1, H_2, \dots); \\ A = f(m); D = f(m); j_D = f(m); \varepsilon_i = m_i/m_{i-1}] \end{aligned} \quad (2.78)$$

– для технологічного успадкування параметрів якості виробу від заготовки до деталі

$$\left. \begin{aligned} m_{x_1} < \dots < m_{x_k} < \dots < m_{x_n} \rightarrow \infty; v_{x_1} > \dots > v_{x_k} > \dots > v_{x_n} \rightarrow 0; \\ A_{x_1} < \dots < A_{x_k} < \dots < A_{x_n} \rightarrow 1; D_{x_1} > \dots > D_{x_k} > \dots > D_{x_n} \rightarrow 0; \\ \varepsilon_{x_1} > \dots > \varepsilon_{x_k} > \dots > \varepsilon_{x_n} \rightarrow 0; \\ \prod_{i=1}^n \varepsilon_i \geq \varepsilon_p \end{aligned} \right\} \text{за } T_0 = \sum_{k=1}^n t_{ok}, (2.79)$$

– для структурно-неоднорідного стану матеріалу поверхневого шару виробу

$$m < 10; v \rightarrow 1(100\%); A_m < 0,878; D \rightarrow 1, \quad (2.80)$$

– для структурно-однорідного стану матеріалу поверхневого шару виробу

$$m \geq 10; v \rightarrow 0; A_m \geq 0,878; D \rightarrow 0, \quad (2.81)$$

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

Значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у залежностях (2.78)–(2.81) визначають за формулами (1.29)–(1.31), константи матеріалу A_m – за формулою (2.21), технологічної пошкоджуваності D та інтенсивності її зростання j_D – за формулами (2.25) і (2.26) відповідно.

Кількість використовуваних показників (2.78)–(2.81) для оцінки однорідності матеріалу заготовки деталі на визначеному технологічному переході встановлюється складністю виконуваних технологічних завдань для різних етапів проектування. Складність виконуваних завдань підвищується від заготівельних і

чорнових операцій до чистових, фінішних і викінчувально-зміцнювальних. Зокрема, однорідність матеріалу вхідної заготовки аналізують за показниками m , A_m , а гомогенність матеріалу кінцевої деталі – за показниками m , A_m , D , ε тощо.

2.5. Технологічне забезпечення вихідних параметрів якості деталей машин на стадії їхнього розроблення у життєвих циклах із врахуванням впливу елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)»

Дослідження формування регламентованих вихідних параметрів якості виробів на технологічних операціях ТП їхнього виготовлення із врахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(З) для забезпечення експлуатаційних характеристик і пов'язаних з ними показників надійності деталей і машин є важливим завданням для формоутворення працездатних виробів.

Поряд з тим, розрахунок показників надійності сучасних технічних систем ґрунтується на прогнозуванні граничного стану елемента системи (п. 1.2.1).

Граничний стан машини на рівні системи визначається заданими замовником регламентованими показниками безвідмовності та довговічності. При використанні теорії розмірних ланцюгів по чергово визначають граничні показники надійності від агрегату/складальної одиниці (підсистеми першого порядку), вузла (підсистеми n -го порядку) до рівня деталі (підсистеми k -го порядку). Забезпечення показників надійності здійснюється у зворотній послідовності: граничні стани вузлів описуються через граничні стани їхніх деталей, граничні стани агрегатів – через граничні стани їхніх вузлів, а граничний стан машини – через граничні стани її агрегатів.

Згідно [128] працездатний стан об'єкту виробництва (виробу) – стан технічного об'єкта, при якому він здатний виконувати необхідні функції. Працездатний стан може бути визначений як стан об'єкта, в якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідає вимогам, встановленим в конструкторсько-технологічній документації на цей об'єкт.

Ступенем оцінки забезпечення регламентованого параметра виробу є величина допуску для розмірів, параметрів якості поверхневих шарів, відхилень форми і їхнього взаємного розташування тощо, що визначається значеннями граничних відхилень. Досягнення нижньої чи верхньої границі допуску регламентованим параметром виконавчої чи базової поверхонь виробу під час його виготовлення чи експлуатації спричинює перехід виробу у граничний стан за заданим показником.

Згідно [128] під граничним станом розуміють стан технічного об'єкта, при переході в який його подальша експлуатація недопустима або недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне. При цьому недопустимість подальшої експлуатації встановлюється на основі оцінки ризиків, тоді як недоцільність або неможливість відновлення встановлюється різними способами.

Під час виготовлення виробу граничний стан для елементів системи ВПД(З) має різне інтерпретування. Для заготовки виробу під час її оброблення на визначеній технологічній операції граничний стан визначається фактичним значенням хоча б одного з її параметрів біля нижньої (охоплювані поверхні) або верхньої (охоплюючі поверхні) границі допуску згідно технічних вимог конструкторсько-технологічної документації і недопустимими технологічними дефектами у матеріалі виробу. Для металорізального верстату, верстатного пристрою та металорізального інструменту граничний стан визначається погіршенням їхніх вихідних параметрів в процесі експлуатації внаслідок зношування, втоми тощо та досягненням фактичним значенням хоча б одного з їх регламентованих вихідних параметрів значень біля нижньої або верхньої границь допусків.

Розроблено узагальнену принципову схему (рис. 2.8) дослідження впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на формування регламентованих параметрів якості заготовки виробу із застосуванням PSPAS-системи у взаємозв'язках із САФ-системою (варіант (А), рис. 2.9), як незалежного елемента

інтегрованої конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (варіант (Б), рис. 2.9), як основного елемента КТПВ (варіант (В), рис. 2.9)

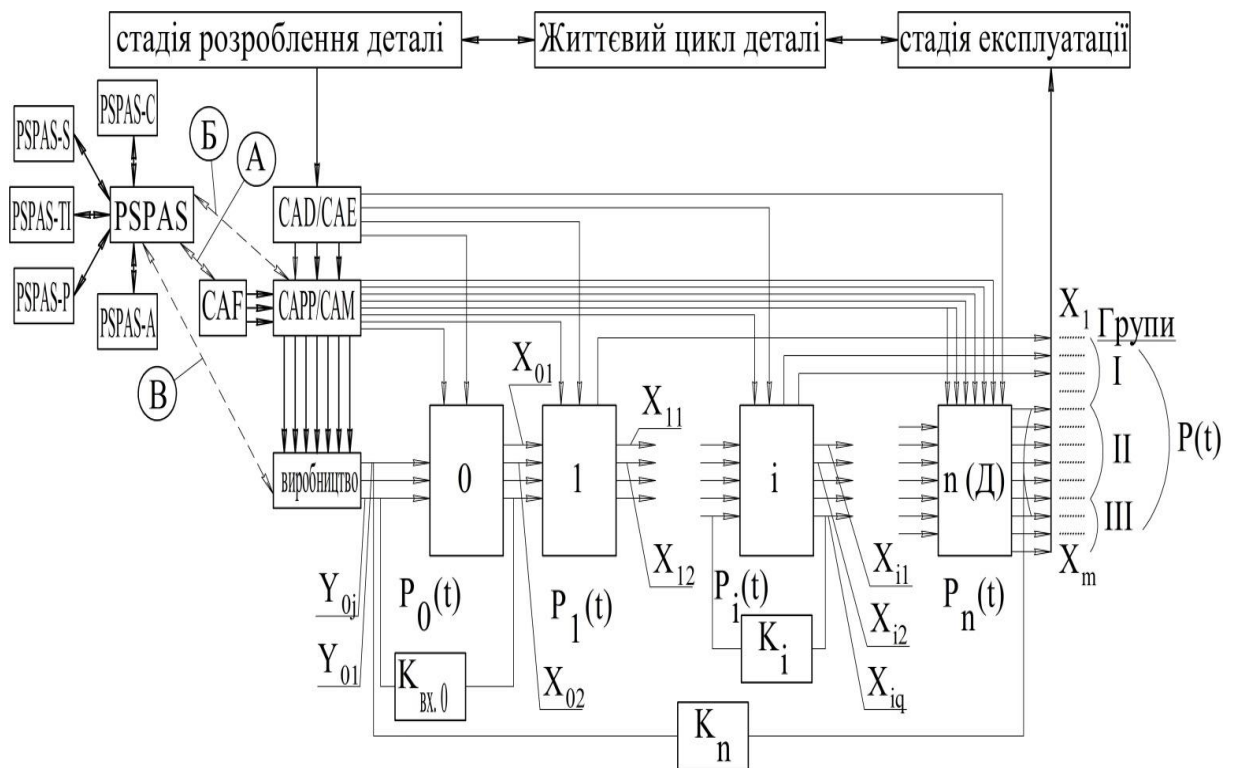


Рис. 2.9. Принципова схема дослідження впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на формування регламентованих параметрів якості заготовки виробу на стадії його розроблення у життєвому циклі

Під час виготовлення виробу параметр $P_i(t)$ інтерпретується як ймовірність недостиження граничного стану деталі на i -тій операції технологічного процесу, що забезпечується отриманням на даній позиції, переході, робочому ході множини параметрів виробу у межах регламентованих технічними вимогами значень із допустимими технологічними дефектами згідно ТУ при реалізації технічних рішень інтегрованої конструкторсько-технологічної підготовки виробництва та впливом системи ВПД(З) (рис. 2.9). В даному випадку значення регламентованих параметрів виробу знаходяться між їхніми допустимими граничними значеннями згідно визначених ТУ.

Отже, під досягненням граничного стану заготовки деталі приймають забезпечення її фактичних вихідних параметрів на технологічному переході, технологічній операції, технологічному та виробничому процесі у межах їхніх граничних значень із допустимими технологічними дефектами в оброблюваному матеріалі.

Поряд з тим $F_i(t)$, на противагу $P_i(t)$, при виготовленні виробу інтерпретується як ймовірність досягнення граничного стану деталі на i -тій операції технологічного процесу, що забезпечується отриманням на даній позиції, переході, робочому ході множини параметрів виробу, при якому хоча б для одного з його параметрів його фактичне значення знаходиться біля нижньої або верхньої границі допуску згідно технічних вимог конструкторсько-технологічної документації і недопустимими технологічними дефектами у матеріалі виробу.

При комплексному дослідженні процесів механічного оброблення деталей і складання машин враховується технологічне успадковування властивостей для усього ланцюжка «вхідна заготовка – вихідна деталь» при аналізі фізичних процесів на етапах КТПВ та виготовлення виробу стадії його створення виробу у життєвому циклі (рис. 2.9).

Формування вихідних параметрів відбувається в результаті послідовного оброблення заготовки деталі, що аналізується процесами технологічного успадковування властивостей [43, 44, 82]. Для кожної операції, як правило, встановлено свої регламентовані показники, які забезпечуються в результаті виконання технологічних переходів при обробленні виробу.

Тому загальна ймовірність $P(t)$ – 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 [326, 327]:

1. Незначна частина вихідних параметрів проміжних операцій (зокрема характеристики матеріалу) переходять у розряд кінцевих (параметри I групи, рис. 2.9).

2. Фінішні та викінчувальні технологічні операції забезпечують формування регламентованих технічними вимогами параметрів точності оброблення та якості поверхні (параметри II групи, рис. 2.9).

3. Відповідно до технологічного успадковування властивостей і параметрів частина вихідних параметрів (III група, рис. 2.9) функціонально пов'язана з параметрами попередніх проміжних операцій.

4. Характеристики матеріалу, заготовки при неналежному вхідному контролі або його відсутності впливають на формування кінцевих параметрів виробу.

5. Контрольні операції (K , рис. 2.9) служать для своєчасного виявлення та недопущення браку на різних стадіях ТП.

У той же час на формування вихідних параметрів виробу впливає не лише фактор часу, а й випадкові функції (r, g, \dots, t) .

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:

$$P_{X_{ij}}(r, k, \dots, t) = \prod_{j=1}^{q_i} (1 - F_{X_{ij}}(r, g, \dots, t)), \quad (2.82)$$

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 -ій технологічній операції технологічного процесу під час його виготовлення.

Вихідні параметри після останньої технологічної операції: $X_{nj} = X_j$ ($j \in [1; m]$).

Множина вихідних параметрів q_i для i -тої технологічної операції формує множину вхідних параметрів для $(i+1)$ операції, однак лише частина із них входить до множини параметрів I групи вихідних параметрів кінцевого виробу: $q_{0i} < q_i$ [200].

Тоді сумарна кількість вихідних параметрів [200]:

$$m = q_n + \sum_{i=0}^{n-1} q_{oi}. \quad (2.83)$$

де q_n – число вихідних параметрів, отриманих на останній операції; q_{oi} – число вихідних параметрів для i -тої технологічної операції, які формують вихідні параметри І групи.

Для технологічного процесу при незалежному формуванні кожного вихідного параметра ймовірність формування працездатного стану деталі $P(t)$ в загальному випадку визначається за формулою [200]:

$$P(r, k, \dots, t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=0}^n \prod_{j=1}^m P_{X_{ij}}(r, g, \dots, t), \quad (2.84)$$

де $P_{X_{ij}}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність досягнення граничного стану заготовки деталі за j -им параметром на i -тій технологічній операції технологічного процесу її виготовлення.

Поряд з тим на визначеній технологічній операції як зв'язаній підсистемі ТП (технологічна система) при використанні елементів технологічної системи: металорізального верстата, пристрою на металорізальному верстаті і металорізального(них) інструменту(тів) забезпечується множина регламентованих параметрів якості виробу згідно технічних вимог.

Тому для i -тої технологічної операції технологічного процесу виготовлення виробу визначається ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі за умови досягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом та їхніми елементами зокрема [128].

Доцільним є аналіз ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі із врахуванням впливу елементів технологічної системи на i -тій технологічній операції із застосуванням математичного апарату опису марковських процесів [3, 313, 314]. Технологічний граф надійності для i -тої технологічної операції, що описується ланцюгами Маркова, приведено на рис. 2.10.

Вершини технологічного графа надійності на i -й технологічній операції (рис. 2.10) описують можливість перебування технічної системи у $(k+3)$ можливих станах із врахуванням впливу елементів технологічного середовища: 1 – елементи технологічної системи ВПД(З): металорізальний верстат (МРВ), пристрій на

металорізальному верстаті (МПр), металорізальний інструмент (МРІ) 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. 2.9 позначено λ_{MPB_i} , $\lambda_{МПр_i}$, $\lambda_{MPI_i_1}$, ..., $\lambda_{MPI_i_k}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстату, пристрою на металорізальному верстаті та першого/ k -того металорізального інструменту або їхніх елементів на i -й технологічній операції під час оброблення заготовки виробу.

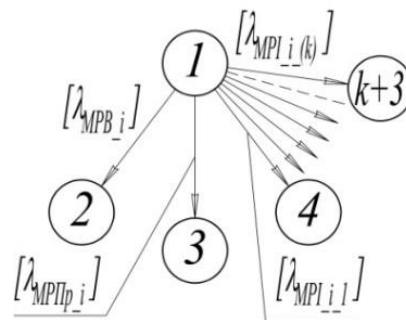


Рис. 2.10. Технологічний граф надійності для i -тої технологічної операції, що описується ланцюгами Маркова, для прогнозування ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі із врахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(З)

Відповідно до рис. 2.10 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. 2.10) із врахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(3) на забезпечення регламентованих параметрів якості машинобудівного виробу для i -тої технологічної операції має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_i} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPP_i} \cdot P_1(t) - \sum_{k=1}^z \lambda_{MPI_i(k)} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_i} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MPP_i} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_i_1} \cdot P_1(t), \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dP_{z+3}(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_i_z} \cdot P_1(t), \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + \dots\dots\dots P_{z+3}(t) &= 1, \quad t \in [0; t] \end{aligned} \quad (2.85)$$

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

Останнє рівняння у системі (2.85) представляє теорему додавання несумісних подій [3]. З точки зору опису фізичної суті прогнозування забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на i -тій технологічній операції із врахуванням впливу елементів системи ВПД(3) дане рівняння представлено у формі:

$$P_{D(3)i}(r, g, \dots, t) + F_{MPBi}(r, g, \dots, t) + F_{MPPi}(r, g, \dots, t) + \sum_{k=1}^z F_{MPI(k)i}(r, g, \dots, t) = 1, \quad (2.86)$$

де $P_{D(3)i}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі на i -тій технологічній операції технологічного процесу

виготовлення виробу за умови недостиження граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом та їхніми елементами зокрема; $F_{MPBi}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при досягненні граничного стану металорізальним верстатом загалом або його елементами зокрема; $F_{MPPi}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при досягненні граничного стану пристроєм на металорізальному верстаті загалом або його елементами зокрема; $F_{MPI i}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при досягненні граничного стану металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом або його (їхніми) елементами зокрема; k – k -ий металорізальний інструмент на i -тій технологічній операції.

Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу за умови недостиження граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним (ними) інструментом (тами) загалом та їх елементами зокрема визначають із формули (2.86):

$$P_{Д(3)i}(r, g, \dots, t) = 1 - F_{MPBi}(r, g, \dots, t) - F_{MPPi}(r, g, \dots, t) - \sum_{k=1}^z F_{MPI(k)i}(r, g, \dots, t). \quad (2.87)$$

Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу визначається ймовірностями досягнення граничних станів металорізальним верстатом $F_{MPBi}(r, g, \dots, t)$, пристроєм на металорізальному верстаті $F_{MPPi}(r, g, \dots, t)$ і металорізальним (ними) інструментом (тами) $F_{MPI i}(r, g, \dots, t)$ загалом та їхніми елементами зокрема.

Поряд з тим елементи технологічної системи ВПД(3) мають визначені параметри надійності згідно технічних вимог на їх виготовлення та експлуатацію,

які забезпечують регламентовані параметри якості деталей машин в процесі їх формоутворення, контролю та складання.

При цьому умови забезпечення їх працездатності при виконанні технологічних завдань визначаються нерівностями:

$$\begin{aligned} P_{Д(3)i}(r, g, \dots, t) &\geq [P_{Д(3)}]; \\ P_{MPBi}(r, g, \dots, t) &\geq [P_{MPB}]; \\ P_{MPPi}(r, g, \dots, t) &\geq [P_{MPP}]; \\ P_{MPI(k)i}(r, g, \dots, t) &\geq [P_{MPI}]; \end{aligned} \quad (2.88)$$

де $P_{MPBi}(r, g, \dots, t)$, $P_{MPPi}(r, g, \dots, t)$, $P_{MPI(k)i}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при недосягненні граничного стану відповідно металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті k -им металорізальним інструментом загалом або його (їхніми) елементами зокрема; $[P_{Д(3)}]$, $[P_{MPB}]$, $[P_{MPP}]$, $[P_{MPI}]$ – регламентована ймовірність забезпечення визначеного показника надійності заготовки деталі, металорізального верстата, верстатного пристрою та металорізального інструменту.

Із врахуванням (2.86) і відомої з теорії ймовірності теореми додавання несумісних подій нерівності (2.88) набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} P_{Д(3)i}(r, g, \dots, t) &\geq [P_{Д(3)}]; \\ (1 - F_{MPBi}(r, g, \dots, t)) &\geq [P_{MPB}]; \\ (1 - F_{MPPi}(r, g, \dots, t)) &\geq [P_{MPP}]; \\ (1 - F_{MPI(k)i}(r, g, \dots, t)) &\geq [P_{MPI}]; \end{aligned} \quad (2.89)$$

Оптимізація вихідних параметрів технологічних операцій зокрема та технологічного процесу загалом здійснюється поряд із оптимізацією параметрів елементів технологічної системи ВПД (3) і вибором раціональної структури технологічного маршруту оброблення виконавчих і базових поверхонь виробу. У даному випадку оптимізується кількість технологічних переходів у межах технологічної операції та кількість технологічних операцій у межах технологічного процесу виготовлення виробу, тобто оптимізується кількість підсистем на різних рівнях технічної системи. Це дозволяє в самоорганізованих системах керувати

їхньою адаптивністю та надійністю умовами формування та величинами флуктуацій за рахунок зміни кількості підсистем [295]. В замкнених ізольованих підсистемах ентропія зростає, і для забезпечення цієї умови у розімкнених відкритих підсистемах, що обмінюються ресурсами і інформацією із зовнішнім середовищем, застосовують розподіл ймовірностей і введення ізольованих резервів [64].

2.6. Висновки розділу 2

1. Маловідповідальні деталі машин проєктують повністю за алгоритмом, що реалізує традиційну концепцію об'єктно-орієнтованого проєктування (ООП). Проєктування технологічних процесів виготовлення деталей машин, що працюють в умовах силового навантаження та інтенсивного зношування, забезпечується принципами функціонально-орієнтованого проєктування (ФОП) для їхніх виконавчих (функціональних) поверхонь і об'єктно-орієнтованого проєктування для їхніх вільних (зв'язуючих) поверхонь. Технологічний процес (ТП) із поєднанням принципів ООП і ФОП називають функціонально-орієнтованим або гібридним ТП.

2. Розроблено концептуальну модель проєктування функціонально-орієнтованого (гібридного) ТП. На першому етапі розраховують показники надійності визначеної деталі за показниками надійності машини (агрегата, вузла) згідно принципу ФОП. При проєктуванні структури технологічних маршрутів оброблення виконавчих поверхонь враховується вплив технологічного успадковування після кожного технологічного переходу та елементів технологічного середовища: пристрій – інструмент – верстат на забезпечення регламентованих параметрів якості виробів і їхніх експлуатаційних характеристик.

3. Технологічне успадковування параметрів якості виробу забезпечується характеристиками його матеріалу та параметрами якості поверхневого шару виробу. Відповідно до прийнятої гіпотези гомогенність (однорідність) матеріалу визначають як параметр для аналізу технологічного успадковування за оцінкою деградації властивостей матеріалу для раціонального вибору заготовки та проєктування раціональної структури технологічного маршруту оброблення виконавчих (функціональних) поверхонь та ТП виготовлення виробів.

4. Гомогенність при побудові статистичних теорій міцності описується розподілом Вейбулла та характеризується структурно-чутливим параметром – коефіцієнтом гомогенності у розподілі Вейбула (m). Коефіцієнт гомогенності Вейбула (m), що визначають методом ЛМ-твердості, характеризує стан поверхні визначеного виробу під час його виготовлення або експлуатації для конкретного матеріалу. Для порівняння стану різних матеріалів для різних умов використовують пов'язані із коефіцієнт гомогенності Вейбула (m) характеристики: константу матеріалу A_m , технологічну пошкоджуваність D та інтенсивність зростання пошкоджуваності j_D для аналізу технологічного успадкування параметрів під час проектування технологічних маршрутів оброблення поверхонь деталей машин, що працюють в умовах силового навантаження та інтенсивного зношування, для забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик.

5. Встановлено, що в умовах самоорганізації систем механічного оброблення у машинобудівному виробництві із використанням обмеженої кількості оптимальних технологічних параметрів для забезпечення регламентованих параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності деталей машин проектування раціональної структури технологічного маршруту оброблення їхніх виконавчих (функціональних) поверхонь реалізують для принципу функціонально-орієнтованого проектування за показниками однорідності матеріалу на відміну від вибору методів технологічних обробок за параметрами точності та якості поверхневого шару для принципу об'єктно-орієнтованого проектування. Для принципу функціонально-орієнтованого проектування уточнення параметрів від вхідної заготовки до вихідної деталі забезпечується на визначеному технологічному переході співвідношенням коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) на даному та попередньому переходах. Збільшення значень (m) від заготовки до деталі при обробленні її поверхні характеризується зменшенням неоднорідності матеріалу та його меншу схильність до пошкоджуваності у процесі експлуатації.

6. Регламентовані технічними умовами параметри точності, якості поверхневого шару, експлуатаційні характеристики та показники надійності деталей машин формуються при обробленні заготовки деталі при технологічному

успадковуванні від першого до k -ого технологічних переходів і операцій при дотриманні вимог: $m_{x_0} < m_{x_1} < \dots < m_{x_k} < \dots < m_{x_n} \rightarrow \infty$; $v_{x_0} > v_{x_1} > \dots > v_{x_k} > \dots > v_{x_n} \rightarrow 0$;
 $A_{x_0} < A_{x_1} < \dots < A_{x_k} < \dots < A_{x_n} \rightarrow 1$; $D_{x_0} > D_{x_1} > \dots > D_{x_k} > \dots > D_{x_n} \rightarrow 0$; $\varepsilon_{x_1} > \dots > \varepsilon_{x_k} > \dots > \varepsilon_{x_n} \rightarrow 0$.

7. Структурна неоднорідність матеріалу, що розглядають на макро-, мікро- та субмікрорівнях, при виготовленні деталей машин визначається хімічним складом матеріалу, методом отримання та технологією формоутворення вхідної заготовки, наявністю макродефектів (включень, пор, раковин) після заготівельних операцій і технологічних оброблень.

8. Висунуто гіпотезу можливості реалізації трьох варіантів технологічного успадковування властивостей матеріалу на макрорівні. Перший і другий варіанти забезпечують необхідні для умов експлуатації параметри якості виробу при їхньому технологічному успадковуванні без зміни початкового стану матеріалу заготовки. Третій варіант забезпечує перетворення структурно-неоднорідного матеріалу заготовки після зняття дефектного шару реалізації ТП у структурно-однорідний матеріал готової деталі.

9. Методологія функціонально-орієнтованого проєктування ґрунтується на системі паралельного інжинірингу (Concurrent engineering) при застосуванні CAD/CAE/CAPP/CAM-систем. CAF-система (Computer Aided Forming) забезпечує ефективну реалізацію методології PLM в машинобудуванні на основі принципу паралельного проєктування при впровадженні функціонально-орієнтованих технологій. Розроблено структуру та методичне забезпечення PSPAS – системи (Product Shaping/Processing Analysis System – система аналізу формоутворення виробу), що використовується як складова CAF-системи або незалежний елемент у конструкторсько-технологічній підготовці виробництва для забезпечення принципу ФОП під час виготовлення машинобудівних виробів.

10. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності деталей машин, що працюють в умовах силового навантаження та інтенсивного зношування, реалізується в рамках підсистеми аналізу технологічного успадковування при формоутворенні виробу (PSPAS-ТІ) системи аналізу

формоутворення виробу (PSPAS-системи). В рамках PSPAS-ТІ-підсистеми необхідні експлуатаційні характеристики та показники надійності на різних етапах виготовлення деталей машин забезпечуються за параметрами і показниками критерію однорідності матеріалу у підсистемах аналізу гомогенності відповідно матеріалу вхідної заготовки (PSPAS-ТІНМВ) і матеріалу при формоутворенні заготовки виробу (PSPAS-ТІНМВ), що формують підсистему аналізу технологічного успадковування за характеристиками матеріалу виробу (PSPAS-ТІМ).

11. Стратегією розвитку функціонально-орієнтованих технологій є розроблення комбінованих і гібридних технологій. У PSPAS-системі досліджуються взаємозв'язки та закономірності при реалізації підсистеми модифікування поверхні при ППД (PSPAS-SPD/S/ТІ), що формується внаслідок взаємозв'язків підсистеми ППД (PSPAS-SPD) як складового елемента підсистеми аналізу формоутворення виробу методом пластичного деформування, підсистеми аналізу модифікування поверхневого шару виробу (PSPAS-S) і підсистеми аналізу технологічного успадковування при формоутворенні виробу (PSPAS-ТІ).

12. Розрахунок показників надійності сучасних технічних систем ґрунтується на прогнозуванні граничного стану елемента системи. Граничний стан машини на рівні системи визначається заданими замовником регламентованими показниками безвідмовності та довговічності. При використанні теорії розмірних ланцюгів почергово визначають граничні показники надійності від агрегату/складальної одиниці (підсистеми першого порядку), вузла (підсистеми n-го порядку) до рівня деталі (підсистеми k-го порядку). Забезпечення показників надійності здійснюється у зворотній послідовності: граничні стани вузлів описуються через граничні стани їхніх деталей, граничні стани агрегатів – через граничні стани їхніх вузлів, а граничний стан машини – через граничні стани її агрегатів.

РОЗДІЛ 3.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ УСПАДКОВУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ВИРОБІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАРШРУТІВ ОБРОБЛЕННЯ ЇХНІХ ПОВЕРХОНЬ ЗА КРИТЕРІЄМ ГОМОГЕННОСТІ МАТЕРІАЛУ

Впровадження принципу функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів для сучасного машинобудування реалізується застосуванням системи аналізу формоутворення виробу – PSPAS-системи (Product Shaping/Processing Analysis System). Залежно від типу та організаційної форми виробництва PSPAS-системи інтегрується у автоматизовану систему аналізу формоутворення виробу САФ-системи (Computer Aided Forming) при виготовленні виробів (рис. 2.7) або використовується як незалежний елемент у структурі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. Для умов одиничного та дрібносерійного виробництва PSPAS-система застосовується як незалежний елемент інтегрованої конструкторсько-технологічної підготовки виробництва або як основний елемент КТПВ. Потребують розроблення важливі підсистеми PSPAS-системи, зокрема підсистема аналізу технологічного успадкування під час формоутворення виробу за критерієм гомогенності (однорідності) матеріалу, що сприятиме зменшенню працемісткості робіт та етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, реалізації вибору технологічних маршрутів оброблення виконавчих поверхонь за принципом ФОП та контролю ступеня деградації матеріалу заготовки виробу на всіх етапах технологічного ланцюжка «вхідна заготовка – вихідна деталь».

3.1. Дослідження вхідних параметрів заготовки виробу за критерієм однорідності її матеріалу

У практиці матеріалознавства та технології машинобудування відомі методи оцінки ступеню пошкоджуваності матеріалу на підставі напрацювання за

результатами як прямих (методи виважування, металографії тощо), так і непрямих (омічного опору, акустичної емісії тощо) вимірювань механічних характеристик металу без руйнування [164, 170]. Застосування вказаних способів для оцінювання деградації матеріалу в результаті накопичення пошкоджень під час напрацювання супроводжується великими похибками, оскільки взаємозв'язок між вимірюваними параметрами та характеристиками структурно-фазового стану для широкої номенклатури матеріалів неоднозначний та ґрунтовно не вивчений.

Незважаючи на значну кількість гіпотез для прогнозування пошкоджуваності матеріалу для складного напруженого стану, оцінити деградацію структури матеріалу у несприятливих умовах експлуатації при аналізі діаграм розтягу або твердості, надскладно [164, 170], що пояснюється відсутністю стійкої кореляції вимірюваних величин з механічними характеристиками і фактичним структурним станом для відомих прямих і непрямих методів аналізу стану матеріалу [174, 175].

Сформовані на стадії розроблення виробу дефекти структури у машинобудівних матеріалах при несприятливих експлуатаційних умовах перетворюються у технологічні пошкодження, які прогнозуються за допомогою математичного апарату механіки руйнування та механіки пошкодженого середовища [25, 37].

Для механіки пошкодженого середовища справедлива математична залежність [203]:

$$\tilde{M} = \frac{M}{1 - D_M}, \quad (3.1)$$

де M , \tilde{M} – відповідно величини істинної та ефективної властивостей оброблюваного матеріалу виробу; D_M – кінетика накопичення пошкоджень (пошкоджуваність) для заданої властивості матеріалу деталі.

Встановлено [203], що важливими параметрами вичерпання ресурсу матеріалу є процеси накопичення пошкоджень та деградації його фізико-механічних властивостей для характерних видів руйнування виробів: на розрив – E та зріз – G . Параметром для аналізу еволюції деградації матеріалу для визначених умов

експлуатації є пошкоджуваність матеріалу при осьовому навантаженні – D_σ та при зсуві – D_τ [203]:

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}_i}{E_0}}, \quad (3.2)$$

$$D_\tau = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}_i}{G_0}}. \quad (3.3)$$

Використання математичних залежностей (3.2), (3.3) у машинобудівній практиці вимагає спеціального вартісного обладнання та висококваліфікованого персоналу для забезпечення експериментальних досліджень, тому є потреба у подальших дослідженнях у даному напрямку.

У той же час застосування методу LM-твердості у інженерній практиці забезпечує неруйнівний контроль параметрів ТП за розсіюванням характеристик твердості матеріалу виробу під час розрахунків коефіцієнта варіації ν або коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) та пов'язаними з ним константою матеріалу A_m або технологічною пошкоджуваністю D .

Якщо розподіл коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у матеріалі виробу по глибині (товщині) заготовки невідомий, то його технологічна пошкоджуваність D оцінюється за поточними значеннями (m) у досліджуваних перерізах. При виборі раціональної заготовки при невідомому розподілу коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у матеріалі виробу по глибині (товщині) заготовки контролюють розсіювання значень твердості у різних перерізах. Оптимальною буде заготовка із найбільшим середнім значенням коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), розрахованих для лімітуючих перерізів досліджуваної заготовки.

В процесі вибору раціонального маршруту оброблення виконавчої поверхні виробу при невідомому розподілі коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у матеріалі виробу по глибині (товщині) заготовки порівнюються значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) для альтернативних варіантів обробки. При цьому оптимальним буде варіант із найбільшим значенням коефіцієнта гомогенності

Вейбулла (m) для останнього переходу, що забезпечує найменшу схильність до технологічної пошкоджуваності матеріалу виробу.

Поряд з тим, в процесі вибору раціонального маршруту оброблення поверхні виробу доцільно застосовувати константу матеріалу $A_m=f(m)$ як один з показників у критерії однорідності матеріалу (КОМ) для аналізу технологічного успадковування параметрів якості виробів. Контроль здійснюється за оцінкою ступеня деградації матеріалу виробу після кожного технологічного переходу механічного оброблення об'єкта виробництва для забезпечення його експлуатаційних характеристик і показників надійності.

3.1.1. Контроль вхідних параметрів заготовки вала 6Е4-2717.00.00.01 за критерієм однорідності її матеріалу

Експериментальні дослідження аналізу процесу формування параметрів вхідної заготовки проведено для вала 6Е4-2717.00.00.01, виготовленого на ТзОВ «Транссистем» (м. Львів) (рис. 3.1).

Вал 6Е4-2717.00.00.01 є базовою деталлю приводного барабана стрічкового транспортера ТС 1850. Згідно ТУ вид заготовки – круг $\frac{160-B \text{ ГОСТ } 2590-88}{40X-3-T \text{ ГОСТ } 4543-71}$. Матеріал деталі – сталь 40Х ГОСТ 4543-71. Габаритні розміри заготовки $\varnothing 160 \times 2105$ мм, маса заготовки – 332,24 кг, маса деталі – 243 кг, коефіцієнт використання матеріалу – 0,731.

Однорідність оброблюваного матеріалу на даному етапі експериментальних досліджень проаналізовано за показниками КОМ: поточними значеннями коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) і константи матеріалу A_m у досліджуваних перерізах при невідомому розподілі величин (m) у матеріалі виробу по глибині (товщині) заготовки.

З огляду на значні габарити та масу вхідної заготовки твердість виміряно переносним твердоміром ТД-42 фірми «Ультракон» за стандартною методикою методом Брінеля [43, 44].

Вимірювання твердості заготовки здійснено в осьових перерізах під розташування виконавчих, спряжених поверхонь вала – шийок в розмір $\varnothing 125h7$, $\varnothing 148h9$, $\varnothing 148h9$, $\varnothing 125h7$, $\varnothing 90h7$ та вільної поверхні в розмір $\varnothing 156h14$ (рис. 3.1). Для кожного перерізу заготовки здійснено дві серії по 30-35 вимірювань твердості.



a)



б)

Рис. 3.1. Вал 6Е4-2717.00.00.01 (продукція ТзОВ «Транссистем» (м. Львів))

На підставі експериментальних досліджень проаналізовано однорідність матеріалу заготовки вала в процесі технологічного успадковування параметрів у перерізах під його виконавчі поверхні за розрахунками у середовищі Mathcad 15 коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) за формулами (1.29-1.31), констант матеріалу A_m – за формулою (2.21). Результати досліджень приведено у табл. 3.1 і дод. Д.

Для усіх осьових перерізів заготовки вала під розташування його виконавчих, спряжених поверхонь на підставі результатів експериментальних досліджень отримано близькі до нуля значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла

$m=6,123-11,457 \rightarrow 0$. Це свідчить про низьку впорядкованість структури поверхневого шару, характерну для шарів, які кристалізуються в останню чергу і містять значну кількість технологічних дефектів: неоднорідностей, структурних концентраторів, пор тощо. При цьому обчислені значення константи матеріалу для сталі 40Х ГОСТ 4543-71, що безпосередньо пов'язані із коефіцієнтами гомогенності, $A_m=0,814-0,892 < 0,9$.

Таблиця 3.1

Зміна 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 |

3.1.2. Визначення вхідних параметрів заготовки кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса за критерієм однорідності її матеріалу

Експериментальні дослідження щодо формування параметрів вхідної заготовки проведено для кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса, виготовленого на ТзОВ «ІнтерПЕТ» (м. Львів) (рис. 3.2). Матеріал заготовки сталь 25Л ГОСТ 977-88. Технічними вимогами допускається виготовлення кронштейнів із сталей 35Л, 20 ГЛ ГОСТ 977-88.

Оскільки розподіл коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у матеріалі виробу по глибині (товщині) заготовки невідомий, то однорідність поверхневого шару оцінено за поточними значеннями коефіцієнта (m) у досліджуваних перерізах.

Перерізами для вимірювань слугують зовнішні торці бобишок під закріплення кришок, спряжені із кришками підшипників, для яких у подальших дослідженнях аналізують технологічний маршрут механічного оброблення поверхонь.

Твердість виміряно твердоміром ТД-42 фірми «Ультракон» за стандартною методикою методом Брінеля [43, 44]. Для двох заготовок здійснено по 30-35 вимірювань твердості.

На підставі експериментальних досліджень проаналізовано показники КОМ для заготовки кронштейна при технологічному успадкуванні параметрів для поверхонь бобишок – коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) за формулами (1.29)-(1.31), констант матеріалу A_m – за формулою (2.21). Результати досліджень приведено у табл. 3.2 і дод. Е.

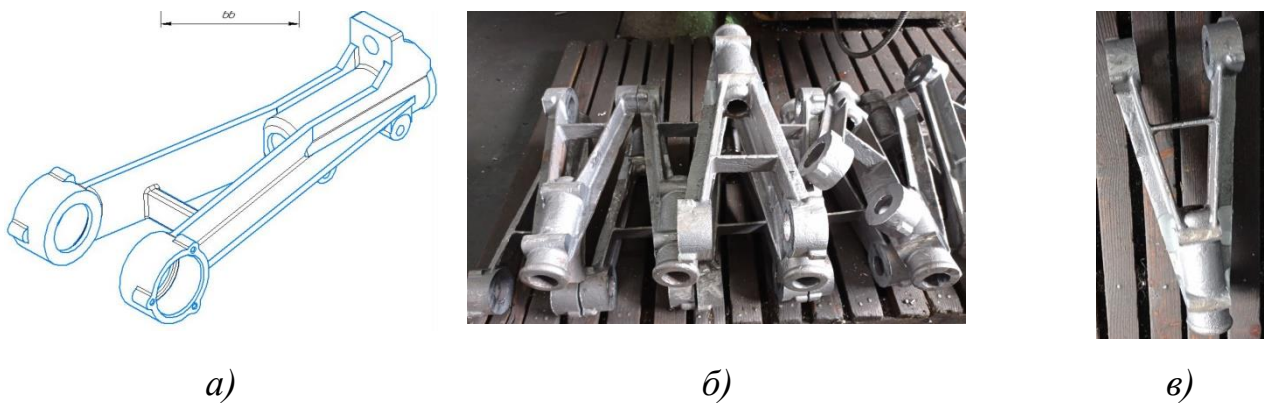


Рис. 3.2. Кронштейн: а) 3D-модель; б), в) виливки

Матеріал заготовки кронштейна підтримки штанги тролейбуса по зовнішній і внутрішній бобишках, розташованих зліва і справа на заготовці деталі, характеризується низькими значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) для двох серій дослідів, що свідчить про низьку впорядкованість структури матеріалу та його високу схильність до пошкоджуваності. Поряд з тим середні значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) для правої бобики є меншими, а їх розсіювання – вищі, ніж для лівої (37,77-55,88 % та 13,18-17,18 %), що свідчить про наявність більшої кількості технологічних дефектів: неоднорідностей, структурних концентраторів тощо у поверхневому шарі. Окрім цього, нижчі значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) для правих бобишок пояснюється конструктивним розташуванням ливникової системи, випорів та черговістю

кристалізації матеріалу вилівка. Обчислені значення константи $A_m=0,756-0,812 < 0,9$ для матеріалу – сталі 25Л ГОСТ 977-88.

Таблиця 3.2

Зміна однорідності матеріалу заготовки
кронштейна підтримки штанги СП1-2110830

| | Бобишка ліва | | Бобишка права | |
|------------|--|---------------------------------|--|---------------------------------|
| | зовнішня | внутрішня | зовнішня | внутрішня |
| Деталь № 1 | 5,11124 | 3,61224 | 5,97464 | 2,69888 |
| | Середнє значення (m) та його розсіювання | Розсіювання значень (m) у % | Середнє значення (m) та його розсіювання | Розсіювання значень (m) у % |
| | 4,362±0,75 | 17,18 | 4,337±1,638 | 37,77 |
| | Константа матеріалу A_m | | Константа матеріалу A_m | |
| | 0,757 | | 0,756 | |
| | Бобишка ліва | | Бобишка права | |
| | зовнішня | внутрішня | зовнішня | внутрішня |
| 6,80305 | 5,21887 | 7,62781 | 2,15887 | |
| Деталь № 2 | Середнє значення (m) та його розсіювання | Розсіювання значень (m) у % | Середнє значення (m) та його розсіювання | Розсіювання значень (m) у % |
| | 6,011±0,792 | 13,18 | 4,893±2,734 | 55,88 |
| | Константа матеріалу A_m | | Константа матеріалу A_m | |
| | 0,812 | | 0,778 | |

3.1.3. Контроль вхідних параметрів алюмінієвих вливок у кокіль за критерієм однорідності їхнього матеріалу

Для експериментальних досліджень відлито заготовки у кокіль (рис. 3.3). Матеріал вливок – алюмінієвий сплав АК21М2,5Н2,5 ГОСТ 1853-93, їхні габаритні розміри – 145×60×15 мм.



Рис. 3.3. Вилівок у кокіль з алюмінієвого сплаву АК21М2,5Н2,5

Заготовки відлито у холодні та підігріті кокілі.

Оскільки розподіл одного з основних показників КОМ – коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у матеріалі виробу по глибині (товщині) заготовки невідомий, то однорідність матеріалу поверхневих шарів оцінено за поточними значеннями (m) у досліджуваних перерізах.

Базову (нижню) поверхню заготовок профрезеровано на вертикально-фрезерному верстаті мод. 6P12 кінцевою фрезою $\varnothing 30$ мм (режими різання: $V=1$ мм, $t=30$ мм, $S = 350$ мм/хв, $n=500$ хв⁻¹).

Вимірювання твердості здійснено на приладі TP-5006 ГОСТ 23677–79 за шкалою Н за допомогою кульки $\varnothing 3,175$ з навантаженням 588,4 Н методом Роквелла за стандартною методикою [164]. Для кожного експерименту проведено 30-35 вимірювань.

На підставі експериментальних досліджень визначено однорідність матеріалу алюмінієвого виливка в процесі аналізу технологічного успадковування параметрів за розрахунками у середовищі Mathcad 15 коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) за формулами (1.29-1.31), констант матеріалу A_m – за формулою (2.15). Результати досліджень приведено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Зміна однорідності матеріалу алюмінієвого призматичного виливка у кокіль

| Номер плавки | Стан кокілю під час розливання сплаву | Аналіз критерію технологічного успадковування виливка | | | | |
|--------------|---------------------------------------|---|------------------|--|---------------------------------|---|
| | | 1 серія дослідів | 2 серія дослідів | Середнє значення (m), його розсіювання | Розсіювання значень (m) у % | Константа матеріалу A_m за середнім значенням (m) |
| 1 | холодний | 25,212 | 16,351 | 20,782±4,43 | 21,32 | 0,937 |
| 2 | підігрітий | 36,155 | 19,006 | 27,581±8,574 | 31,09 | 0,952 |
| 3 | підігрітий | 26,637 | 25,052 | 25,845±0,792 | 3,06 | 0,949 |
| 4 | холодний | 15,889 | 18,856 | 17,373±1,484 | 8,54 | 0,926 |
| 5 | підігрітий | 37,236 | 28,316 | 32,776±4,46 | 13,61 | 0,959 |

Результати досліджень стосовно однорідності формування властивостей виливків у кокіль з алюмінієвого сплаву характеризують зростання значення

коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) в процесі формоутворенні виливків в умовах зменшення температурного поля між металом, який кристалізується, і формою при заливанні розплаву у підігріті кокілі (табл. 3.3). Це пояснюється меншим рівнем розвитку неоднорідностей в умовах кристалізації у підігрітому кокілі порівняно із холодним. Поряд з тим розсіювання значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) для двох серій вимірювань твердості за Роквелом на поверхні виливків є значним і складає 8,54-21,32 % при кристалізації у холодному кокілі і 3,07-31,09 % в процесі формоутворення у підігрітому кокілі. Однак порівняно із сталевими заготовками константа матеріалу для алюмінієвих виливків у кокіль є вищою $A_m=0,926-0,959 > 0,9$.

3.1.4. Визначення вхідних параметрів виливка у піщано-глинясті форми за критерієм однорідності його матеріалу

В піщано-глинисту форму відлито плоску заготовку із розмірами 165×155×22 мм з матеріалу АК21М2.5Н2.5 ГОСТ 1853–93 (рис. 3.4). Край виливка, його випори і ливник відрізано пилою при подачі МОР у зону різання. Температурний режим охолодження виливка – 690-710° С. Після кристалізації виливка профрезеровано нижню базову поверхню на вертикально-фрезерному верстаті мод. 6Р12 кінцевою фрезою Ø 30 мм (режими різання: $B=1$ мм, $t=30$ мм, $S = 350$ мм/хв, $n=500$ хв⁻¹). Із вхідного виливка підготовлено дві заготовки для подальших експериментальних досліджень (рис. 3.5).

Першу заготовку (рис. 3.5, *a*, *б*) отримано після відрізання пилою в розмір 155×22×22 мм, після чого дві протилежні до базової поверхні оброблено за стандартною методикою приготування шліфів для мікроструктурних досліджень [38, 174]. Другу заготовку із концентраторами напружень розрізано на три зразки-заготовки: з ливником, малим і великим випорами (рис. 3.6). Мета експериментальних досліджень – встановити вплив розміщення ливника та малого випора на еволюцію технологічних дефектів у матеріалі від поверхні до матриці та виявити дефектний шар із максимальною кількістю технологічних пошкоджень, що підлягає видаленню у стружку.

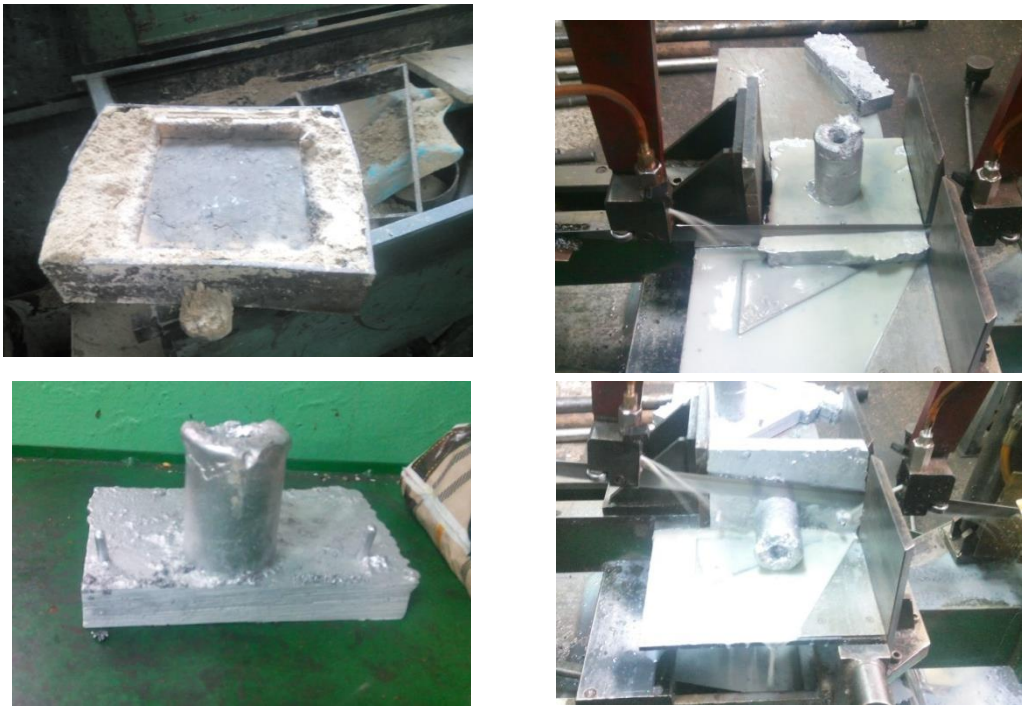


Рис. 3.4. Технологічний процес виготовлення виливка у землю

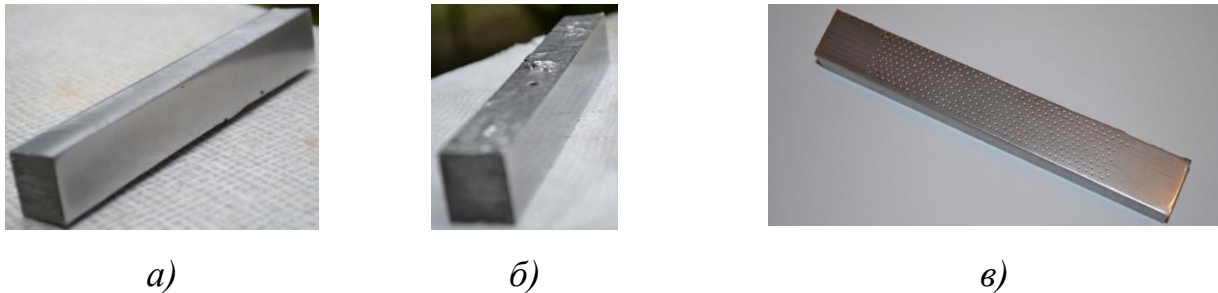


Рис. 3.5. Заготовка – зразок: розташування вверху *а)* базовою поверхнею; *б)* вхідною литою поверхнею; *в)* після вимірювань твердості

Для першої заготовки розмічено від нижньої базової поверхні вгору через 2 мм перерізи для контролю твердості методом ЛМ-твердості; при цьому внаслідок нерівності верхньої необробленої поверхні заготовки (після лиття) отримано з внутрішньої сторони – 9 перерізів, із зовнішньої сторони – 10 перерізів. Здійснено по 30-35 вимірювань для кожного перерізу твердості за стандартною методикою на приладі ТР-5006 ГОСТ 23677–79 за шкалою Н за допомогою кульки $\varnothing 3,175$ з навантаженням 588,4 Н за стандартною методикою методом Роквела [38, 174]. При

цьому відбитки розміщено в шаховому порядку у двох сусідніх перерізах. Заготовку після вимірювань твердості приведено на рис. 3.5, в.

Торцеві сторони 1 і 2 зразків із другої заготовки (рис. 3.5) двічі почергово профрезеровано на універсально-фрезерному верстаті мод. 676 ($B=2$ мм; $t=45$ мм; $S_{хв.}=42$ мм/хв; $n=640$ хв⁻¹) кінцевою фрезою $\varnothing 45$ мм ($z=2$). Після кожного фрезерування виміряно твердість у п'яти перерізах (по 30-35 значень) на відстанях 2, 4, 7, 12, 17 мм від поверхні виливка. Вимірювання твердості здійснено аналогічно першому зразку.

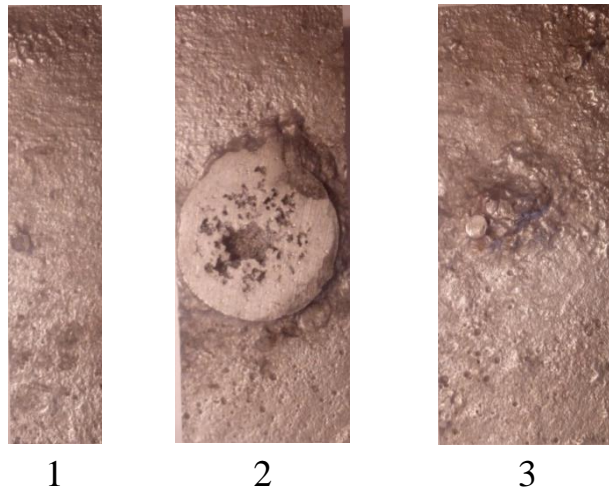


Рис. 3.6. Зразки, отримані із другої заготовки, для експериментальних досліджень: 1 – з малим випором; 2 – з ливником; 3 – з великим випором

На підставі експериментальних досліджень проаналізовано однорідність матеріалу алюмінієвого виливка при технологічному успадкуванні параметрів за розрахунками у середовищі Mathcad 15 показників КОМ – коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) за формулами (1.29-1.31), технологічної пошкоджуваності D – за формулою (2.25).

Зміну коефіцієнта гомогенності (m) і технологічної пошкоджуваності D по товщині (глибині) виливків для першої заготовки приведено на рис. 3.7, для другої – на рис. 3.8 і дод. Ж.

На підставі проведених досліджень стосовно аналізу ступеня однорідності за показниками КОМ заготовки із алюмінієвого сплаву встановлено, що найбільша кількість технологічних пошкоджень характерна для приповерхневої зони матеріалу

внутрішньої та зовнішньої сторони заготовки на глибині до 2-4 мм від поверхні, яка кристалізується в останню чергу (рис. 3.7). Це пояснюється специфікою процесу затверднення матеріалу, наявністю домішок і неоднорідностей у поверхневому шарі та підтверджується з однієї сторони малими значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) (рис. 3.7, а), а з іншої – великими значеннями технологічної пошкоджуваності D (рис. 3.7, б). В процесі подальшого переміщення вглиб матеріалу (від 2 до 4 мм) спостерігається стабілізація пошкоджуваності для внутрішньої сторони та відносні її коливання для зовнішньої сторони заготовки, що пов'язане з умовами процесу кристалізації заготовки (рис. 3.7).

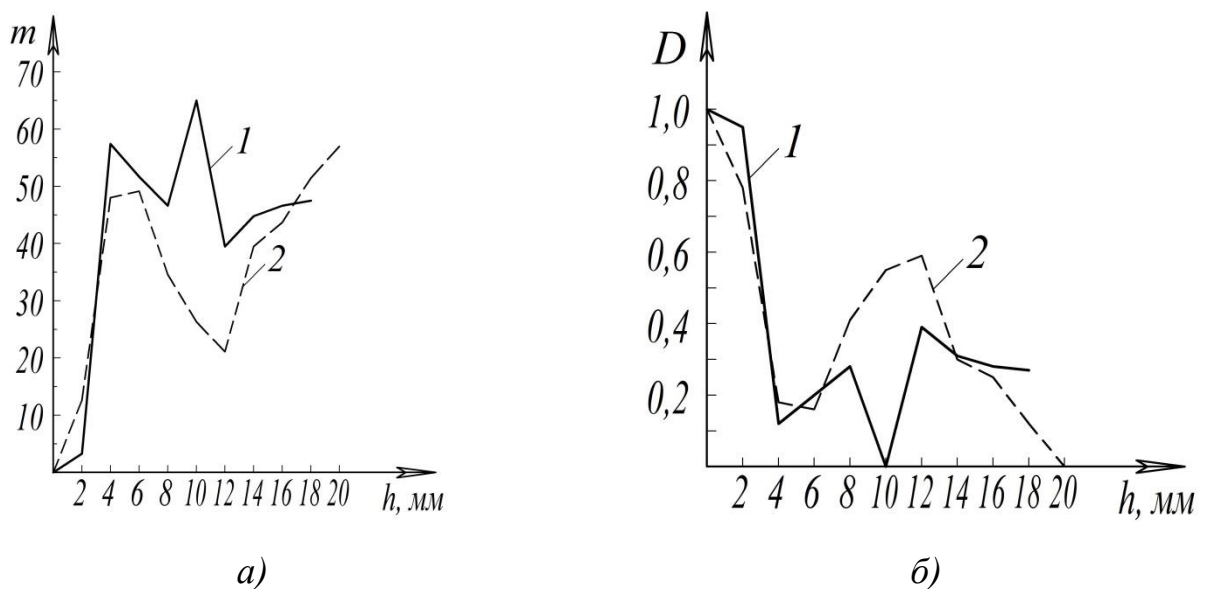


Рис. 3.7. Зміна коефіцієнта гомогенності m (а) і пошкоджуваності матеріалу D (б) по висоті для внутрішньої (1) та зовнішньої (2) сторін зразка

Для другої заготовки (рис. 3.8) найбільша кількість технологічних дефектів характеризує структурні зони матеріалу на глибині до 2 мм від поверхні для зразка із ливником порівняно із зразком з малим випором. Зі сторони малого випора цей вплив інтенсивніший, зі сторони великого випора – слабший. Це визначається особливостями кристалізації матеріалу, наявністю домішок і неоднорідностей у поверхневому шарі та усадкової раковини, зміщеної від вісі симетрії та зорієнтованої у напрямку до малого випора, та підтверджується мінімальними значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), а також максимальними

значеннями технологічної пошкоджуваності D . У зв'язку з цим шар металу на глибині 2 мм від поверхні підлягає механічному обробленню для всіх видів заготовок.

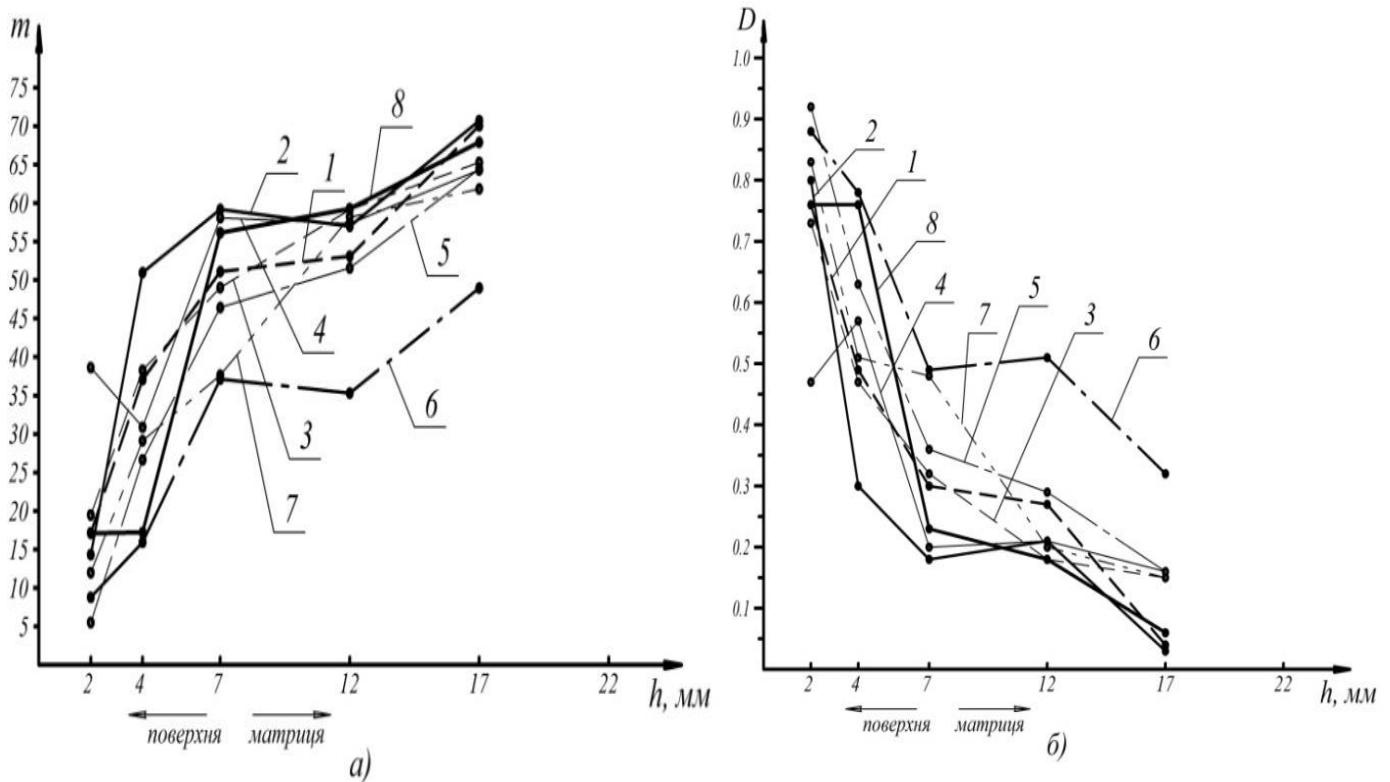


Рис. 3.8. Зміна коефіцієнта гомогенності m (а) і пошкоджуваності матеріалу D (б) по висоті для зразків 1 і 2 (рис. 3.6) : 1, 2 – від випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 3, 4 – з протилежного торця від випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 5, 6 – для ливника зі сторони випора малого для першої та другої серії дослідів відповідно; 7, 8 – для ливника зі сторони випора великого для першої та другої серії дослідів

При переміщенні від поверхні до основного матеріалу у перерізах від 2 до 7 мм спостерігається тенденція до зменшення технологічної пошкоджуваності для зразка з малим випором при переході від першої до другої фрезерної обробок (рис. 3.8). Поряд з тим в розглядуваних перерізах зі сторони від ливника пошкоджуваність є вищою, що свідчить про вплив елементів конструкції форми на

розподіл домішок і неоднорідностей у структурних зонах виливка. Для зразка із ливником технологічна пошкоджуваність зростає під час переміщення до усадкової раковини для другої серії дослідів. Подальше переміщення від поверхні заготовок до основного матеріалу у перерізах від 7 до 17 мм супроводжується зменшенням технологічної пошкоджуваності матеріалу D . Стабілізація процесу (зменшення динаміки зміни величини D) починається із глибини 7 мм, що підтверджується зростанням значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і їхнім наближенням до раціональних значень (рис. 3.8). Однак для перерізу ливника (зі сторони малого випора) переміщення до його центру характеризується зменшенням значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) за умови переходу від першої до другої серії. Такі результати пояснюються впливом наявної усадкової раковини на еволюцію домішок та фізико-хімічних дефектів структури.

3.1.5. Дослідження інтенсивності технологічних дефектів після формоутворення виливка в піщано-глинисті форми

Дослідження інтенсивності (густини) технологічних дефектів у поверхневому шарі для внутрішньої сторони проведено для 1 заготовки виливка (рис. 3.5) на електронному мікроскопі ZEISS EVO 40XVP [38]. Результати досліджень інтенсивності дефектів (пошкоджень) поверхні для внутрішньої сторони заготовки на електронному мікроскопі представлено на рис. 3.9-3.12.

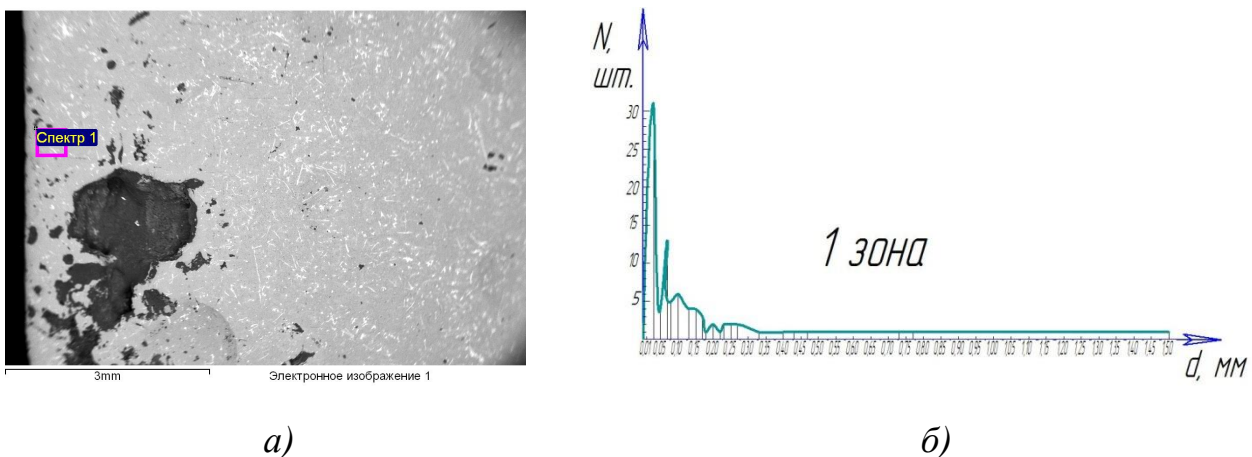


Рис. 3.9. Дослідження у I зоні від поверхні виливка:
а) структура; б) залежність кількості дефектів N від їхніх розмірів d

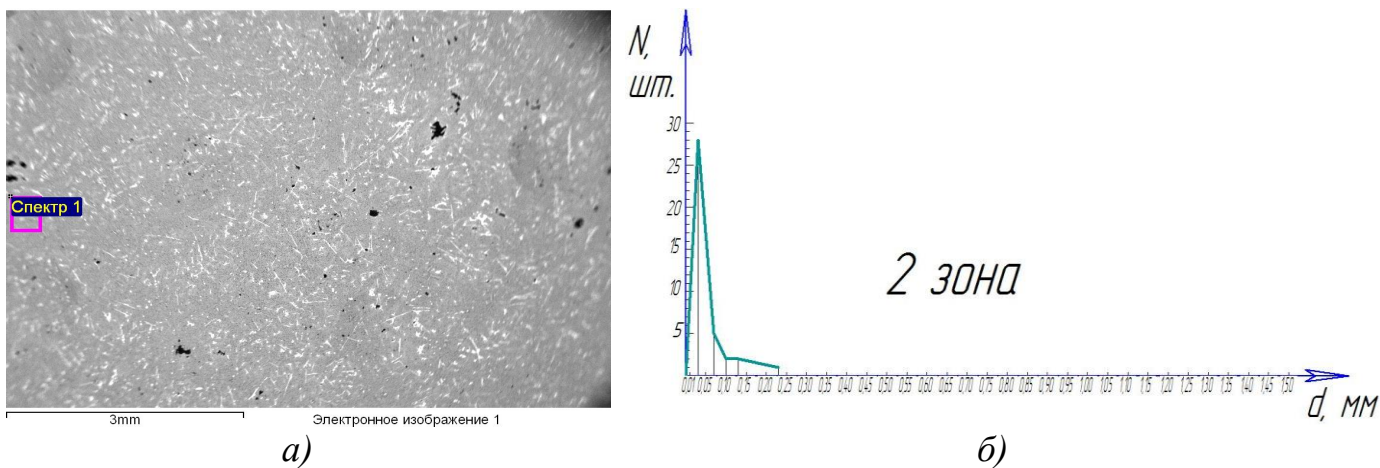


Рис. 3.10. Дослідження у II зоні від поверхні виливка:

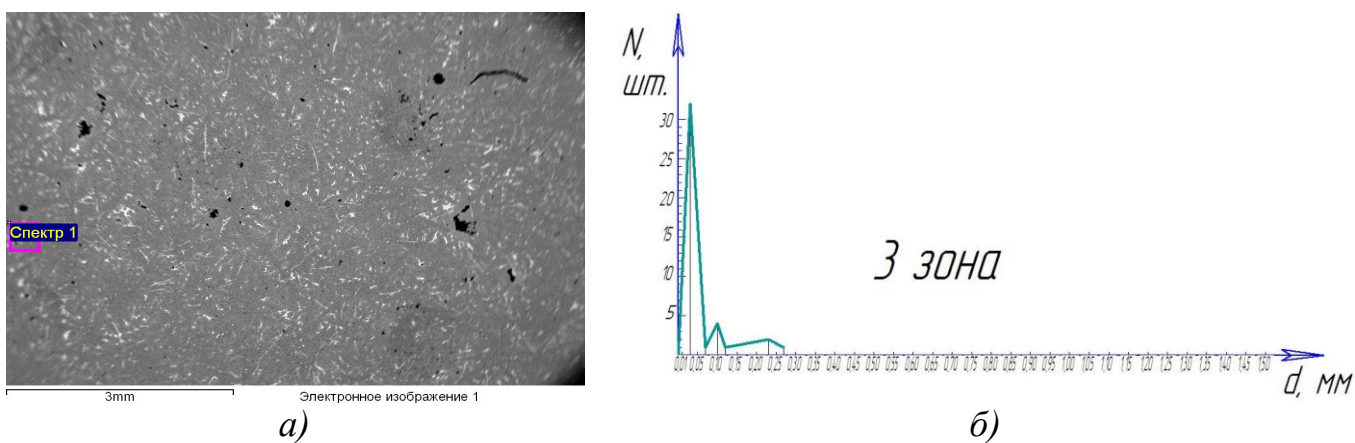
а) структура; б) залежність кількості дефектів N від їхніх розмірів d 

Рис. 3.11. Дослідження у III зоні від поверхні виливка:

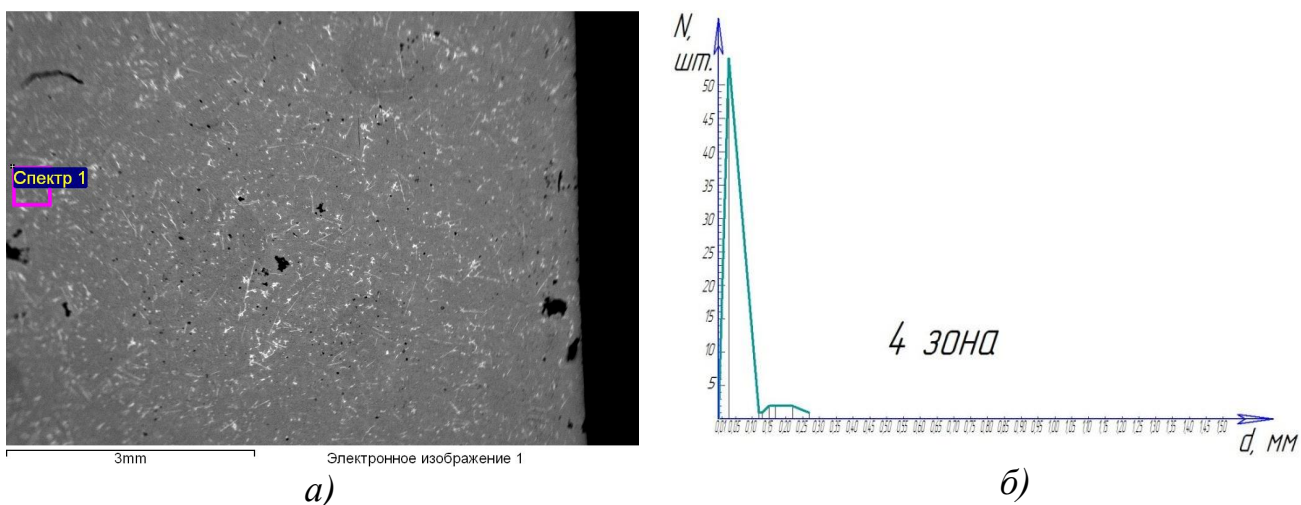
а) структура; б) залежність кількості дефектів N від їхніх розмірів d 

Рис. 3.12. Дослідження у IV зоні від поверхні виливка:

а) структура; б) залежність кількості дефектів N від їхніх розмірів d

При накладанні сітки із кроком 10 мм на фотографії структуру матеріалу у I–IV зонах розраховано відносну пористість (дефектність) структури P , %, за формулою [38]:

$$P = \frac{L_{def.}}{L_{заг.}}, \quad (3.4)$$

де $L_{def.}$ – загальна довжина ліній сітки із дефектами; $L_{заг.}$ – загальна довжина ліній сітки.

Графік залежності $P=f(h)$ для внутрішньої сторони заготовки представлено на рис. 3.13.

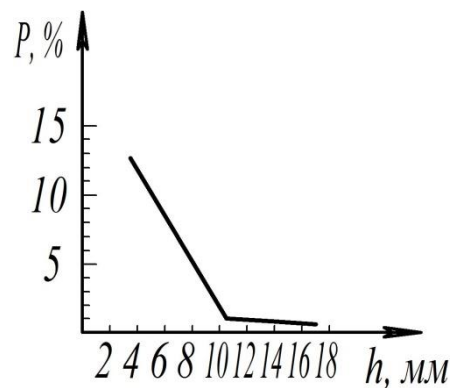


Рис. 3.13. Залежність відносної пористості (дефектності) структури P досліджуваного зразка

Отримані результати свідчать, що найбільша кількість технологічних пошкоджень у вилитій заготовці утворюється на глибині до 2 мм від поверхні (рис. 3.9), яка кристалізується в останню чергу (зона I). Це пов'язано із специфікою процесу затверднення металу, наявністю домішок і неоднорідностей у поверхневому шарі та підтверджується малими значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) (рис. 3.7, а), а також великими значеннями пошкоджуваності D (рис. 3.7, б).

За подальшого переміщення вглиб матеріалу (від 2 до 4 мм) у зоні I (рис. 3.9) спостерігається зменшення пошкоджуваності, а також її стабілізація для внутрішньої сторони та відносні її коливання для зовнішньої сторони заготовки. Це пов'язано з умовами процесу кристалізації вилівка. На відстані 4–6 мм

пошкоджуваність суттєво зменшується. Різниця у пошкоджуваності для внутрішньої та зовнішньої сторін заготовки на відстані 10 мм від поверхні (рис. 3.7) обумовлена тим, що внутрішня сторона розташована на відстані 40 мм від живильника, а зовнішня – на відстані 60 мм. Тобто під час кристалізації внутрішня сторона заготовки краще підживлюється рідким металом, ніж зовнішня. Зростання пошкоджуваності на відстані 12 мм від поверхні виливка обумовлено тим, що ця зона знаходиться посередині виливка, де внаслідок тепловідведення по всіх напрямках формується дезорієнтована мікроструктура первинних кристалів. В зонах утворення направлених кристалітів пошкоджуваність є меншою [38].

Технологічні дефекти присутні у всіх досліджуваних зонах матеріалу (рис. 3.9–3.12). Однак, якщо у зоні II розмір пор не перевищує 0,22 мм, в зонах III–IV – 0,27 мм, то в зоні I є одиничні пори розміром 1,5 мм. На більшу кількість ливарних пошкоджуваність вказує і відносна дефектність структури P , яка у зоні I є більшою майже в 10 разів порівняно із іншими зонами (рис. 3.13) [38].

Згідно спектрального аналізу встановлено підвищення вмісту кисню та зменшення алюмінію у верхній частині виливка (зона I) порівняно з нижньою частиною (зона IV). Розподіл кремнію, міді, хрому, цинку та заліза у всіх зонах загалом є рівномірним.

3.1.6. Розроблення алгоритму раціонального вибору заготовки виробу на підставі критерію однорідності її матеріалу

Алгоритм раціонального вибору заготовки виробу на підставі критерію однорідності матеріалу (КОМ) такий.

1. Аналіз множини функціональних поверхонь виробу відповідно до забезпечення експлуатаційних характеристик з огляду на його службове призначення виробу та встановлення відповідності вимог точності та якості поверхневих шарів експлуатаційним характеристикам.

2. Вибір на підставі даних п. 1 декількох альтернативних методів отримання заготовки за умови забезпечення експлуатаційних характеристик виробу при дотриманні вимог до її точності та якості поверхневих шарів.

3. Розроблення планування методу LM-твердості для конкретного матеріалу та конкретної геометричної форми заготовки.

4. Проведення експериментальних досліджень та здійснення статистичного опрацювання їхніх результатів за показниками критерію однорідності матеріалу заготовки деталі для аналізу процесу технологічного успадковування її параметрів.

5. Розроблення на підставі аналізу результатів експериментальних досліджень і залежності (2.78) рекомендацій стосовно раціонального маршруту оброблення функціональної поверхні.

Складністю в реалізації даного методу для адекватного оцінювання альтернативних методів отримання заготовки при застосуванні принципу ФОП для проєктування ТП є наявність ґрунтовної бази даних матеріалів для заготовок визначених геометричних форм і габаритних розмірів.

Після реалізації методу LM-твердості та виконання розрахунку показників критерію однорідності матеріалу заготовки деталі: коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m), констант матеріалу A_m , технологічної пошкоджуваності D для аналізу технологічного успадковування проєктується раціональна заготовка виробу.

3.2. Проєктування раціонального маршруту оброблення виконавчих (функціональних) поверхонь деталей машин при аналізі технологічного успадковування їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу

3.2.1. Розроблення раціональної структури маршрутів оброблення виконавчих (функціональних) поверхонь заготовки вала 6E4-2717.00.00.01 при аналізі технологічного успадковування його параметрів за критерієм гомогенності матеріалу

Структуру технологічних маршрутів механічного оброблення поверхонь вала 6E4-2717.00.00.01 (рис. 3.1) проаналізовано для заводського варіанту, розробленого за критерієм точності оброблення поверхонь і оптимізованого за критерієм однорідності матеріалу (КОМ) з використанням методу LM-твердості.

Розроблені на підприємстві технологічні маршрути механічного оброблення

шийок вала приведено у табл. 3.4.

Позначення виконавчих поверхонь у табл. 3.4 відповідає їх розташуванню зліва направо для розробленого на ТзОВ «Транссистем» ТП конструкції деталі вала (рис. 3.1).

Таблиця 3.4

Технологічні маршрути оброблення виконавчих і спряжених поверхонь вала 6Е4-2717.00.00.01 згідно розробленого на ТзОВ «Транссистем» ТП

| Позначення виконавчої поверхні | Геометричний розмір | Технологічний маршрут оброблення поверхні |
|--------------------------------|----------------------|--|
| 1 | $\varnothing 90h7$ | 1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове 3. Шліфування попереднє 4. Шліфування кінцеве |
| 2 | $\varnothing 125h7$ | 1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове 3. Шліфування попереднє 4. Шліфування кінцеве |
| 3 | $\varnothing 148h9$ | 1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове 3. Шліфування однократне |
| 4* | $\varnothing 156h14$ | Точіння однократне |
| 5 | $\varnothing 148h9$ | 1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове 3. Шліфування однократне |
| 6 | $\varnothing 125h7$ | 1. Точіння чорнове 2. Точіння чистове 3. Шліфування попереднє 4. Шліфування кінцеве |
| * – вільна поверхня вала | | |

Чорнове та чистове точіння шийок вала на ТзОВ «Транссистем» здійснено на токарно-гвинторізному верстаті 1М63 із використанням прохідного різця із твердосплавними пластинами із Т15К6 без застосування МОР.

Режими різання при чорновому точінні пов. 3, 4, 5: $t = 2$ мм; $S_{\text{позд.}} = 0,5$ мм/об; $n = 90$ хв⁻¹; пов. 1, 2, 6: $t = 2$ мм; $S_{\text{позд.}} = 0,5$ мм/об; $n = 100$ хв⁻¹. Режими різання при чистовому точінні пов. 3, 4, 5: $t = 2$ мм; $S_{\text{позд.}} = 0,32$ мм/об; $n = 100$ хв⁻¹; пов. 1, 2, 6: $t = 2$ мм; $S_{\text{позд.}} = 0,32$ мм/об; $n = 125$ хв⁻¹. Твердість після кожного технологічного переходу виміряно твердоміром ТД-42 фірми «Ультракон» за стандартною методикою методом Брінеля [38].

Із аналізу службового призначення вала 6Е4-2717.00.00.01 (рис. 3.1) та аналізу на технологічність встановлено, що критерій для визначення розрахункового уточнення згідно принципу ООП для всіх шийок вала служить регламентований технічними вимогами параметр їх точності.

Встановлення методів оброблення поверхонь вала за критерієм точності та формування технологічних маршрутів їх оброблення здійснено за формулами (2.67)-(2.69). Результати обчислень приведено у табл. 3.5.

Поряд з тим методи оброблення поверхонь вала визначено за результатами експериментальних досліджень при розрахунку показників КОМ: коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) за формулами (1.29-1.31) у середовищі Mathcad 15.

Методи оброблення поверхонь за розрахунковим уточненням за розсіюванням характеристик твердості матеріалу встановлено за формулами (2.75), (2.69), (2.76).

Зміну однорідності матеріалу заготовки виробу за коефіцієнтом гомогенності (m) для технологічних маршрутів оброблення шийок вала 6Е4-2717.00.00.01 приведено у табл. 3.6 і дод. Д.

Результати експериментальних досліджень за класичним методом і запропонованим для визначення критерію однорідності матеріалу методом ЛМ-твердості:

1. Проектування технологічного маршруту обробки $\varnothing 90h7$ мм:

- класичний метод :

Таблиця 3.5

Встановлення методів оброблення поверхонь за критерієм точності оброблення поверхонь

| Поверхня (сукупність поверхонь) | Розмір, мм | Квалітет | Допуск T, мкм | Шорсткість Ra, мкм | Допуск/шорсткість заготовки T _{заг.} Ra _{заг.} , мкм | Уточнення по кресленню ε _y | Розрахункова кількість переходів n | Прийнята кількість переходів n _{пр.} | Можливі методи оброблення | Точність оброблення за довідником T _{д.} , мкм | Шорсткість оброблення за довідником Ra, мкм | Дійсне значення уточнення ε _y ді | Загальне значення уточнення ε _y заг. і |
|---------------------------------------|------------|----------|---------------|--------------------|---|--|---------------------------------------|--|------------------------------|--|--|--|--|
| 1 | 90 | 7 | 35 | 1,6 | 3600/ 12,5 | 102,857 | 4,374 | 4 | Точіння чорнове | 540 | 6,3 | 6,667 | 102,884 |
| | | | | | | | | | Точіння чистове | 140 | 3,2 | 3,857 | |
| | | | | | | | | | Шліфування попереднє | 54 | 2,0 | 2,593 | |
| | | | | | | | | | Шліфування кінцеве | 35 | 1,6 | 1,543 | |
| 2, 6 | 125 | 7 | 40 | 1,6 | 3600/ 12,5 | 90 | 4,248 | 4 | Точіння чорнове | 630 | 12,5 | 5,714 | 90,018 |
| | | | | | | | | | Точіння чистове | 160 | 6,3 | 3,938 | |
| | | | | | | | | | Шліфування попереднє | 63 | 2,5 | 2,54 | |
| | | | | | | | | | Шліфування кінцеве | 40 | 1,6 | 1,575 | |
| 3, 5 | 148 | 9 | 100 | 1,6 | 3600 | 36 | 3,383 | 3 | Точіння чорнове | 630 | 12,5 | 5,715 | 36,009 |
| | | | | | | | | | Точіння чистове | 160 | 3,2 | 3,938 | |
| | | | | | | | | | Шліфування кінцеве | 100 | 1,6 | 1,6 | |
| 4 | 156 | 14 | 1000 | 6,3 | 3600 | 3,6 | 1,209 | 1 | Точіння однократне | 1000 | 6,3 | 1,209 | 0,92 |

Таблиця 3.6

Встановлення методів оброблення поверхонь за показником КОМ
(за коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m))

| Поверхня (сукупність поверхонь) | Розмір, мм | Квалітет | T/Ra,, мкм | Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) для заготовки | Допуск заготовки T _{заг.} , мкм | Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) для деталі | Уточнення/розрахункова кількість переходів n | Прийнята кількість переходів n _{пр.} | Можливі методи оброблення | T/Ra,, мкм | (m) по переходах | Дійсне значення уточнення $\epsilon_{y, д і}$ | Загальне значення уточнення $\epsilon_{y, заг. і}$ |
|---------------------------------------|------------|----------|------------|---|---|--|---|--|------------------------------|------------|------------------|--|---|
| 1 | 90 | 7 | 35/1,6 | 6,123 | 3600 | 333,893 | 54,531/ 3,775 | 4 | Точіння чорнове | 540/12,5 | 35,367 | 5,776 | 54,556 |
| | | | | | | | | | Точіння чистове | 140/6,3 | 98,822 | 2,794 | |
| | | | | | | | | | Шліфування попереднє | 54/2,5 | 229,716 | 2,325 | |
| | | | | | | | | | Шліфування кінцеве | 35/1,6 | 333,893 | 1,454 | |
| 2 | 125 | 7 | 40/1,6 | 6,132 | 3600 | 344,588 | 56,195/ 3,804 | 4 | Точіння чорнове | 630/12,5 | 34,023 | 5,548 | 56,199 |
| | | | | | | | | | Точіння чистове | 160/6,3 | 91,926 | 2,702 | |
| | | | | | | | | | Шліфування попереднє | 63/2,5 | 215,619 | 2,346 | |
| | | | | | | | | | Шліфування кінцеве | 40/1,6 | 344,588 | 1,598 | |
| 3 | 148 | 9 | 100/1,6 | 9,665 | 3600 | 206,456 | 21,361/ 2,89 | 3 | Точіння чорнове | 630/12,5 | 40,891 | 4,231 | 21,365 |
| | | | | | | | | | Точіння чистове | 250/3,2 | 100,433 | 2,456 | |
| | | | | | | | | | Шліфування кінцеве | 100/1,6 | 206,457 | 2,056 | |

Продовження табл. 3.6

| Поверхня (сукупність поверхонь) | Розмір, мм | Квалітет | T/ Ra, мкм | Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) для заготовки | Допуск заготовки T _{заг.} , мкм | Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) для деталі | Уточнення/розрахункова кількість переходів n | Прийнята кількість переходів n _{пр.} | Можливі методи оброблення | T/ Ra, мкм | (m) по переходах | Дійсне значення уточнення ε _y ді | Загальне значення уточнення ε _y заг. і |
|---------------------------------------|------------|----------|------------|---|---|--|---|--|------------------------------|------------|------------------|--|--|
| 4 | 156 | 14 | 1000/6,3 | 11,457 | 3600 | 32,060 | 2,798/ 0,971 | 1 | Точіння однократне | 1000/6,3 | 32,060 | 2,798 | 2,798 |
| 5 | 148 | 9 | 100/1,6 | 11,142 | 3600 | 198,227 | 17,791/ 2,718 | 3 | Точіння чорнове | 630/12,5 | 37,694 | 3,383 | 17,792 |
| | | | | | | | | | Точіння чистове | 250/3,2 | 93,542 | 2,482 | |
| | | | | | | | | | Шліфування кінцеве | 100/1,6 | 198,228 | 2,119 | |
| 6 | 125 | 7 | 40/1,6 | 6,101 | 3600 | 336,864 | 55,212/ 3,792 | 4 | Точіння чорнове | 630/12,5 | 33,809 | 5,542 | 55,219 |
| | | | | | | | | | Точіння чистове | 160/6,3 | 88,031 | 2,604 | |
| | | | | | | | | | Шліфування попереднє | 63/2,5 | 218,554 | 2,483 | |
| | | | | | | | | | Шліфування кінцеве | 40/1,6 | 336,864 | 1,541 | |

$$\varepsilon_1 = 6,667 > \varepsilon_2 = 3,857 > \varepsilon_3 = 2,593 > \varepsilon_4 = 1,543;$$

$$Td_w = 3600 \text{ мкм} > Td_1 = 540 \text{ мкм} > Td_2 = 140 \text{ мкм} > Td_3 = 54 \text{ мкм} > Td_4 = 35 \text{ мкм}$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 102,884 > \varepsilon_p = 102,857.$$

- метод ЛМ-твердості:

$$\varepsilon_1 = 5,776 > \varepsilon_2 = 2,794 > \varepsilon_3 = 2,325 > \varepsilon_4 = 1,454;$$

$$m_w = 6,123 < m_1 = 35,367 < m_2 = 98,822 < m_3 = 229,716 < m_4 = 333,893;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 54,556 > \varepsilon_p = 54,531.$$

2. Проектування технологічного маршруту обробки $\varnothing 125h7$ мм:

- класичний метод:

$$\varepsilon_1 = 5,714 > \varepsilon_2 = 3,938 > \varepsilon_3 = 2,54 > \varepsilon_4 = 1,575;$$

$$Td_w = 3600 \text{ мкм} > Td_1 = 630 \text{ мкм} > Td_2 = 160 \text{ мкм} > Td_3 = 63 \text{ мкм} > Td_4 = 40 \text{ мкм};$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 90,018 > \varepsilon_p = 90.$$

- метод ЛМ-твердості:

$$\varepsilon_1 = 5,548 > \varepsilon_2 = 2,702 > \varepsilon_3 = 2,346 > \varepsilon_4 = 1,598;$$

$$m_w = 6,132 < m_1 = 34,023 < m_2 = 91,926 < m_3 = 215,619 < m_4 = 344,588;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 56,199 > \varepsilon_p = 56,195.$$

3. Проектування технологічного маршруту обробки $\varnothing 148h9$ мм:

- класичний метод:

$$\varepsilon_1 = 5,715 > \varepsilon_2 = 3,938 > \varepsilon_3 = 1,6;$$

$$Td_w = 3600 \text{ мкм} > Td_1 = 630 \text{ мкм} > Td_2 = 160 \text{ мкм} > Td_3 = 100 \text{ мкм};$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 36,009 > \varepsilon_p = 36.$$

- метод ЛМ-твердості:

$$\varepsilon_1 = 4,231 > \varepsilon_2 = 2,456 > \varepsilon_3 = 2,056;$$

$$m_w = 9,665 < m_1 = 40,891 < m_2 = 100,433 < m_3 = 206,457;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 21,365 > \varepsilon_p = 21,361.$$

4. Проектування технологічного маршруту обробки

маршруту обробки $\varnothing 156h14$ мм:

- класичний метод:

$$\varepsilon_1 = 3,6;$$

$$Td_w = 3600 \text{ мкм} > Td_1 = 1000 \text{ мкм};$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 3,6 = \varepsilon_p = 3,6.$$

- метод ЛМ-твердості:

$$\varepsilon_1 = 2,798;$$

$$m_w = 11,457 < m_1 = 32,060;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 2,798 > \varepsilon_p = 2,798.$$

5. Проектування технологічного маршруту обробки $\varnothing 148h9$ мм:

- класичний метод:

$$\varepsilon_1 = 5,715 > \varepsilon_2 = 3,938 > \varepsilon_3 = 1,6;$$

$$Td_w = 3600 \text{ мкм} > Td_1 = 630 \text{ мкм} > Td_2 = 160 \text{ мкм} > Td_3 = 100 \text{ мкм};$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 36,009 > \varepsilon_p = 36.$$

- метод ЛМ-твердості:

$$\varepsilon_1 = 3,383 > \varepsilon_2 = 2,482 > \varepsilon_3 = 2,119;$$

$$m_w = 11,142 < m_1 = 37,694 < m_2 = 93,542 < m_3 = 198,228;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 17,792 > \varepsilon_p = 17,791.$$

6. Проектування технологічного маршруту обробки $\varnothing 125h7$ мм:

- класичний метод:

$$\varepsilon_1 = 5,714 > \varepsilon_2 = 3,938 > \varepsilon_3 = 2,54 > \varepsilon_4 = 1,575;$$

$$Td_w = 3600 \text{ мкм} > Td_1 = 630 \text{ мкм} > Td_2 = 160 \text{ мкм} > Td_3 = 63 \text{ мкм} > Td_4 = 40 \text{ мкм};$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 90,018 > \varepsilon_p = 90.$$

- метод ЛМ-твердості:

$$\varepsilon_1 = 5,542 > \varepsilon_2 = 2,604 > \varepsilon_3 = 2,483 > \varepsilon_4 = 1,541;$$

$$m_w = 6,101 < m_1 = 33,809 < m_2 = 88,031 < m_3 = 218,554 < m_4 = 336,864;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 55,219 > \varepsilon_p = 55,212.$$

Результати проведених досліджень представлено на рис. 3.14 ((T) – зміна величини розрахункового уточнення для традиційного методу; (m) – для методу ЛМ-твердості). Встановлено, що в процесі механічного оброблення сталевго вала відбувається зменшення значень проміжних уточнень і величин допуску при переході від попередніх (чорнових) до фінішних (кінцевих) методів оброблення у

технологічному ланцюжку «поверхня заготовки – поверхня деталі» як за критерієм точності при зменшенні величин допусків розмірів, так і за критерієм однорідності матеріалу при збільшенні значень коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m), що характеризує підвищення однорідності структури матеріалу і зменшення схильності до його технологічної пошкоджуваності від заготовки до деталі (рис. 3.14, а).

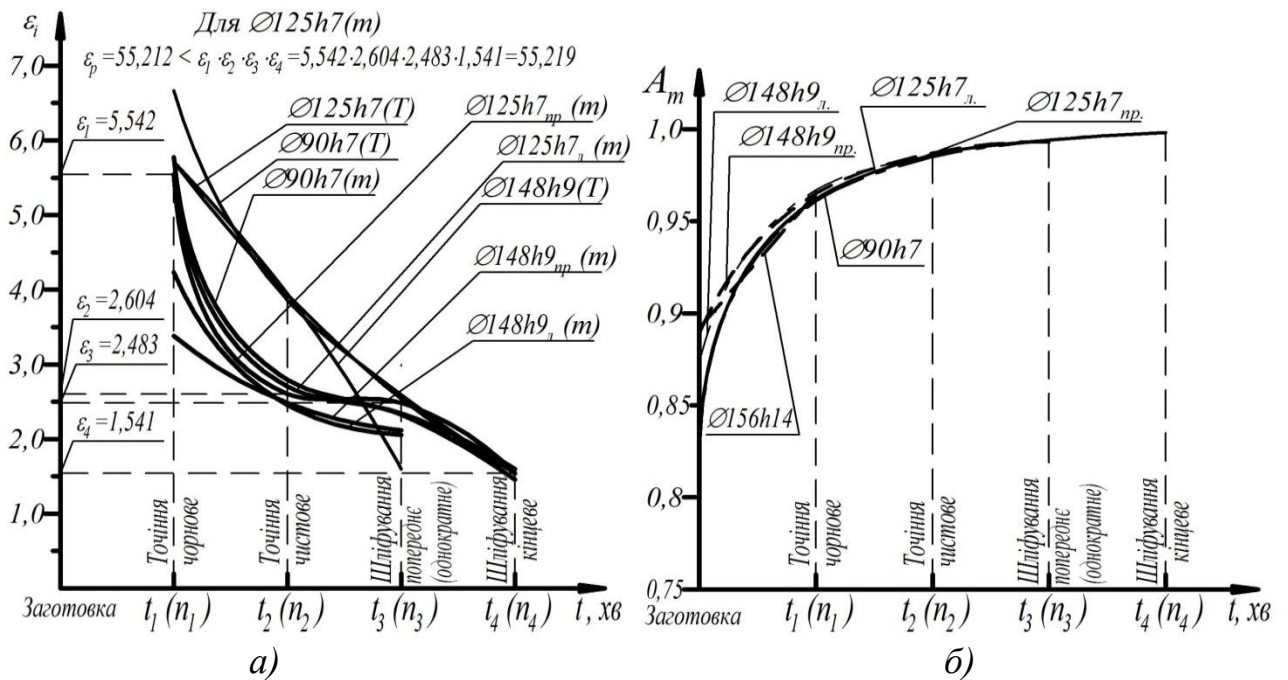


Рис. 3.14. Зміна уточнень після технологічних переходів за критеріями точності й однорідності матеріалу а) та його констант б) для маршрутів обробки поверхонь вала згідно технологічного успадковування ($t_1(n_1)$, $t_2(n_2)$, ..., $t_n(n_n)$ – тривалість 1, 2, n-го технологічних переходів; (T), (m) – зміна уточнень відповідно за точністю оброблення та коефіцієнтом однорідності матеріалу)

Поряд з тим у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – кінцева деталь» після кожного технологічного переходу відбувається зростання (уточнення) константи матеріалу A_m згідно технологічного успадковування (табл. 3.7). При механічному обробленні заготовки вала (рис. 3.14, б) для вибраного методу оброблення виконавчої поверхні значення A_m змінюється у вузьких межах, причому 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 та підтверджує відомі закономірності вибору технологічних обробок для принципу ООП: 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. 3.14, а, б).

Таблиця 3.7

Технологічні маршрути оброблення виконавчих і спряжених поверхонь вала
6Е4-2717.00.00.01 згідно розробленого на ТзОВ «Транссистем» ТП

| Позначення виконавчої поверхні | Геометричний розмір | Технологічний маршрут оброблення поверхні | Константа матеріалу A_m |
|--------------------------------|---------------------|---|---------------------------|
| 1 | Ø 90h7 | Заготовка | 0,815 |
| | | 1. Точіння чорнове | 0,962 |
| | | 2. Точіння чистове | 0,986 |
| | | 3. Шліфування попереднє | 0,994 |
| | | 4. Шліфування кінцеве | 0,996 |
| 2 | Ø 125h7 | Заготовка | 0,815 |
| | | 1. Точіння чорнове | 0,961 |
| | | 2. Точіння чистове | 0,985 |
| | | 3. Шліфування попереднє | 0,994 |
| | | 4. Шліфування кінцеве | 0,996 |
| 3 | Ø 148h9 | Заготовка | 0,874 |
| | | 1. Точіння чорнове | 0,967 |
| | | 2. Точіння чистове | 0,986 |
| | | 3. Шліфування попереднє | 0,993 |
| 4 | Ø 156h14 | Заготовка | 0,892 |
| | | Точіння однократне | 0,959 |
| 5 | Ø 148h9 | Заготовка | 0,889 |
| | | 1. Точіння чорнове | 0,965 |
| | | 2. Точіння чистове | 0,987 |
| | | 3. Шліфування попереднє | 0,993 |
| 6 | Ø 125h7 | Заготовка | 0,814 |
| | | 1. Точіння чорнове | 0,961 |
| | | 2. Точіння чистове | 0,985 |
| | | 3. Шліфування попереднє | 0,994 |
| | | 4. Шліфування кінцеве | 0,996 |

3.2.2. Проектування раціональної структури маршруту оброблення поверхонь сталевих виливків при аналізі технологічного успадковування їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу

Раціональну структуру технологічного маршруту оброблення зовнішніх торців бобишок кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 під закріплення кришок, спряжених із кришками підшипників, спроектовано на підставі аналізу заводського технологічного маршруту. Заводський технологічний маршрут оброблення зовнішніх торців бобишок складається із однократного фрезерування та однократного підрізання торця. Токарну обробку реалізовано разом із обробленням отворів під підшипники при одному встановленні заготовки для технологічного забезпечення перпендикулярності осі отвору до торця бобишки.

Однократне фрезерування бобишок здійснено почергово на вертикально-фрезерному обробному центрі CNC600 кінцевою фрезою $\varnothing 80$ мм із змінними пластинами без застосування мастильно-охолоджувальних рідин (МОР). Режими різання при фрезерному обробленні бобишок: $B=2$ мм; $S=120$ мм/хв; $n=355$ хв⁻¹. Підрізання торців бобишок здійснюється на токарно-гвинторізному верстаті 1Д65 (ДИП500) підрізними різцями з твердосплавними пластинами з Т15К6 без застосування мастильно-охолоджувальних рідин (МОР). Режими різання при підрізанні торців бобишок: $t=2$ мм; $S_{\text{поп.}}=0,114$ мм/об; $n=90$ хв⁻¹.

Твердість після кожного технологічного переходу виміряно твердоміром ТД-42 фірми «Ультракон» за стандартною методикою методом Брінеля [6, 18]. Для двох заготовок здійснено по 30-35 вимірювань твердості.

Із аналізу службового призначення кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса (рис. 3.2) та аналізу на технологічність встановлено, що розрахункові уточнення за принципом ООП доцільно розраховувати за критеріями точності оброблення (допуском на обробку поверхні) і якості поверхні (параметром Ra).

Встановлення методів оброблення поверхонь кронштейна та формування технологічних маршрутів їхнього оброблення за критерієм точності обробки

здійснено за формулами (2.67)-(2.69), а за критерієм якості оброблення – за формулами (2.69)-(2.71). Результати обчислень приведено у табл. 3.8.

Методи оброблення поверхонь кронштейна визначено за результатами експериментальних досліджень при розрахунку коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) за формулами (1.29-1.31) у середовищі Mathcad 15. Раціональні методи оброблення поверхонь встановлено за КОМ із визначенням розрахункових уточнень за розсіюванням характеристик твердості матеріалу за формулами (2.75), (2.69), (2.76).

Зміну коефіцієнта гомогенності (m) для технологічних маршрутів оброблення бобишок кронштейна приведено у табл. 3.9 і дод. Е.

Зроблено аналіз результатів експериментальних досліджень за класичним методом і запропонованим для досліджень деградації матеріалу виробів методом ЛМ-твердості із визначенням констант матеріалу A_m .

1. Проектування маршруту обробки лівої, правої бобишки в розмір 43h14 мм:

- класичний метод (критерій – точність оброблення) :

$$\varepsilon_1 = 6,452 > \varepsilon_2 = 1;$$

$$Td_w = 4000 \text{ мкм} > Td_1 = 620 \text{ мкм} = Td_2 = 620 \text{ мкм};$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 6,452 = \varepsilon_p = 6,452.$$

- класичний метод (критерій – якість оброблених поверхонь) :

$$\varepsilon_1 = 3,968 > \varepsilon_2 = 1,969;$$

$$Ra_w = 25 \text{ мкм} > Ra_1 = 6,3 \text{ мкм} > Ra_2 = 3,2 \text{ мкм};$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 7,813 = \varepsilon_p = 7,813.$$

2. Проектування маршруту обробки лівої бобишки в розмір 43h14 мм (деталь 1):

- метод ЛМ-твердості:

$$\varepsilon_1 = 10,030 > \varepsilon_2 = 1,123;$$

$$m_w = 5,843 < m_1 = 58,607 < m_2 = 65,787; A_{mw} = 0,807 < A_{m1} = 0,977 < A_{m2} = 0,979;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 11,264 > \varepsilon_p = 11,259.$$

3. Проектування маршруту обробки правої бобишки в розмір 43h14 мм (деталь 1):

Таблиця 3.8

Встановлення методів оброблення поверхонь
за критеріями точності оброблення та якості оброблених поверхонь

| Поверхня (сукупність поверхонь) | Розмір, мм | Квалітет | Допуск T, мкм | Шорсткість Ra, мкм | Допуск/шорсткість заготовки T _{заг.} Ra _{заг.} , мкм | Уточнення по кресленню ε _y | Розрахункова кількість переходів n | Прийнята кількість переходів n _{пр.} | Можливі методи оброблення | Точність оброблення за довідником T _д , мкм | Шорсткість оброблення за довідником Ra, мкм | Дійсне значення уточнення ε _{y д.і} | Загальне значення уточнення ε _{y заг.і} |
|--|------------|----------|---------------|--------------------|---|--|---------------------------------------|--|------------------------------|---|--|---|---|
| Критерій оптимізації – точність оброблення бобишок | | | | | | | | | | | | | |
| Деталь 1, 2; ліва, права бобишка зовнішня | 43 | 14 | 620 | 3,2 | 4000/ 25 | 6,452 | 1,76 | 2 | Фрезерування однократне | 620 | 6,3 | 6,452 | 6,452 |
| | | | | | | | | | Підрізання однократне | торця | 620 | 3,2 | |
| Критерій оптимізації – якість оброблення поверхонь бобишок | | | | | | | | | | | | | |
| Деталь 1, 2; ліва, права бобишка зовнішня | 43 | 14 | 620 | 3,2 | 4000/ 25 | 7,813 | 1,941 | 2 | Фрезерування однократне | 620 | 6,3 | 3,968 | 7,813 |
| | | | | | | | | | Підрізання однократне | торця | 620 | 3,2 | |

Таблиця 3.9

Встановлення методів оброблення поверхонь за критерієм однорідності матеріалу
(за коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m))

| Поверхня (сукупність поверхонь) | Розмір, мм | Квалітет | T/R _a , мкм | Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) для заготовки | Допуск/шорсткість заготовки T _{заг.} Ra _{заг.} , мкм | Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) для деталі | Уточнення/розрахункова кількість переходів n | Прийнята кількість переходів n _{пр.} | Можливі методи оброблення | T/R _a , мкм | (m) по переходах | Дійсне значення уточнення ϵ_y ді | Загальне значення уточнення ϵ_y заг. і |
|--|------------|----------|------------------------|---|---|--|---|--|--------------------------------|------------------------|------------------|--|--|
| Деталь 1; ліва бобишка зовнішня | 43 | 14 | 620/ 3,2 | 5,843 | 4000/ 25 | 65,787 | 11,259 /2,275 | 2 | Фрезерування однократне | 620/6,3 | 58,607 | 10,030 | 11,264 |
| | | | | | | | | | Підрізання торця однократне | 620/3,2 | 65,787 | 1,123 | |
| Деталь 1; права бобишка зовнішня | 43 | 14 | 620/ 3,2 | 5,975 | 4000/ 25 | 64,246 | 10,752 /2,242 | 2 | Фрезерування однократне | 620/6,3 | 59,129 | 9,896 | 10,757 |
| | | | | | | | | | Підрізання торця однократне | 620/3,2 | 64,246 | 1,087 | |
| Деталь 2; ліва бобишка зовнішня | 43 | 14 | 620/ 3,2 | 6,803 | 4000/ 25 | 63,819 | 9,381/ 2,117 | 2 | Фрезерування однократне | 620/6,3 | 57,554 | 8,460 | 9,382 |
| | | | | | | | | | Підрізання торця однократне | 620/3,2 | 63,819 | 1,109 | |
| Деталь 2; права бобишка зовнішня | 43 | 14 | 620/ 3,2 | 6,059 | 4000/ 25 | 61,221 | 10,104 /2,184 | 2 | Фрезерування однократне | 620/6,3 | 58,553 | 9,664 | 10,109 |
| | | | | | | | | | Підрізання торця однократне | 620/3,2 | 61,221 | 1,046 | |

- метод LM-твердості:

$$\varepsilon_1 = 9,896 > \varepsilon_2 = 1,087;$$

$$m_w = 5,975 < m_1 = 59,129 < m_2 = 64,246; A_{mw} = 0,811 < A_{m1} = 0,977 < A_{m2} = 0,979;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 10,757 > \varepsilon_p = 10,752.$$

4. Проектування маршруту обробки лівої бобишки в розмір 43h14 мм (деталь 2):

- метод LM-твердості:

$$\varepsilon_1 = 8,46 > \varepsilon_2 = 1,109;$$

$$m_w = 6,803 < m_1 = 57,554 < m_2 = 63,819; A_{mw} = 0,83 < A_{m1} = 0,976 < A_{m2} = 0,979;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 11,264 > \varepsilon_p = 11,259.$$

5. Проектування маршруту обробки правої бобишки в розмір 43h14 мм (деталь 2):

- метод LM-твердості:

$$\varepsilon_1 = 9,664 > \varepsilon_2 = 1,046;$$

$$m_w = 6,059 < m_1 = 59,129 < m_2 = 64,246; A_{mw} = 0,813 < A_{m1} = 0,977 < A_{m2} = 0,979;$$

$$\varepsilon_{y \text{ tot.}} = 10,109 > \varepsilon_p = 10,104.$$

В процесі оброблення вилівка кронштейна спостерігається зменшення значень проміжних уточнень і величин допуску при переході від попередніх (чорнових) до чистових кінцевих методів оброблення у технологічному ланцюжку «поверхня заготовки – поверхня деталі». Поряд з тим стан матеріалу характеризується зменшенням значень проміжних уточнень при переході від попередніх (чорнових) до чистових кінцевих методів оброблення у технологічному ланцюжку «поверхня заготовки – поверхня деталі» поряд із збільшенням значень коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) і констант матеріалу A_m , що забезпечує підвищення однорідності структури матеріалу і зменшення схильності до його технологічної пошкоджуваності.

3.2.3. Розроблення раціональної структури маршруту оброблення поверхонь заготовок у кокіль із алюмінієвих сплавів при технологічному успадковуванні їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу

Для вилівка у кокіль з алюмінієвого сплаву АК21М2,5Н2,5 (рис. 3.2) проаналізовано два варіанти технологічного маршруту оброблення верхньої площини вилівка.

Перший варіант технологічного маршруту оброблення верхньої площини:

- а) лиття в холодні і підігріті кокілі;
- б) чорнове фрезерування кінцевою фрезою;
- в) чистове фрезерування кінцевою фрезою;

Другий варіант технологічного маршруту оброблення верхньої площини:

- а) лиття в холодні і підігріті кокілі;
- б) півчистове фрезерування кінцевою фрезою;
- в) чистове фрезерування кінцевою фрезою.

Для кращої відтворюваності результатів заплановано дві серії дослідів.

Після кожного переходу здійснено контроль твердості верхньої поверхні вилівка на приладі TP5006 за стандартною методикою.

Виливки у кокіль (рис. 3.3) оброблено на універсально-фрезерному верстаті мод. 676 (рис. 3.15) [304].



Рис. 3.15. Фрезерування експериментального зразка

Верхню площину вилівка профрезеровано кінцевими фрезами. Для чорнового оброблення використано металорізальний інструмент $\varnothing 12$ мм ($z=2$),

для півчистового і чистового оброблення – $\varnothing 16$ мм ($z=4$). Для забезпечення коректного виконання експериментальних досліджень на етапі фрезерування виливків при одному встановленні заготовки здійснено обробку для альтернативних переходів технологічних маршрутів оброблення площини.

Режими різання приведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Режими різання при обробленні виливка у кокіль з алюмінієвого сплаву

AK21M2,5H2,5

| Вид механічної обробки | Елементи режимів різання | | | | |
|------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | Ширина фрезерування В, мм | Глибина різання t, мм | Подача $S_{хв}$, мм/хв | Частота обертання n, хв ⁻¹ | Швидкість різання V, м/хв |
| чорнова | 1,0 | 12,0 | 100-120 | 700 | 26,39 |
| півчистова | 0,3 | 16,0 | 13 | 1050 | 52,78 |
| чистова | 0,3 | 16,0 | 13 | 1050 | 52,78 |

Твердість виміряно на приладі TP-5006 кулькою $\varnothing 3,175$ мм під навантаженням 588,4 Н за стандартною методикою [29, 38]. В кожному експерименті проведено по 30-35 вимірювань. Заготовку після вимірювань твердості представлено на рис. 3.16.



Рис. 3.16. Заготовка після вимірювань твердості при використанні приладу TP-5006

Показники КОМ: коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m), технологічну пошкоджуваність D розраховано відповідно за формулами (1.29)-(1.31), (2.25) в середовищі Mathcad 15 за результатами експериментальних досліджень.

Графіки динаміки зміни показників КОМ $m=f(t)$ і $D=f(t)$ представлено на рис. 3.17, 3.18.

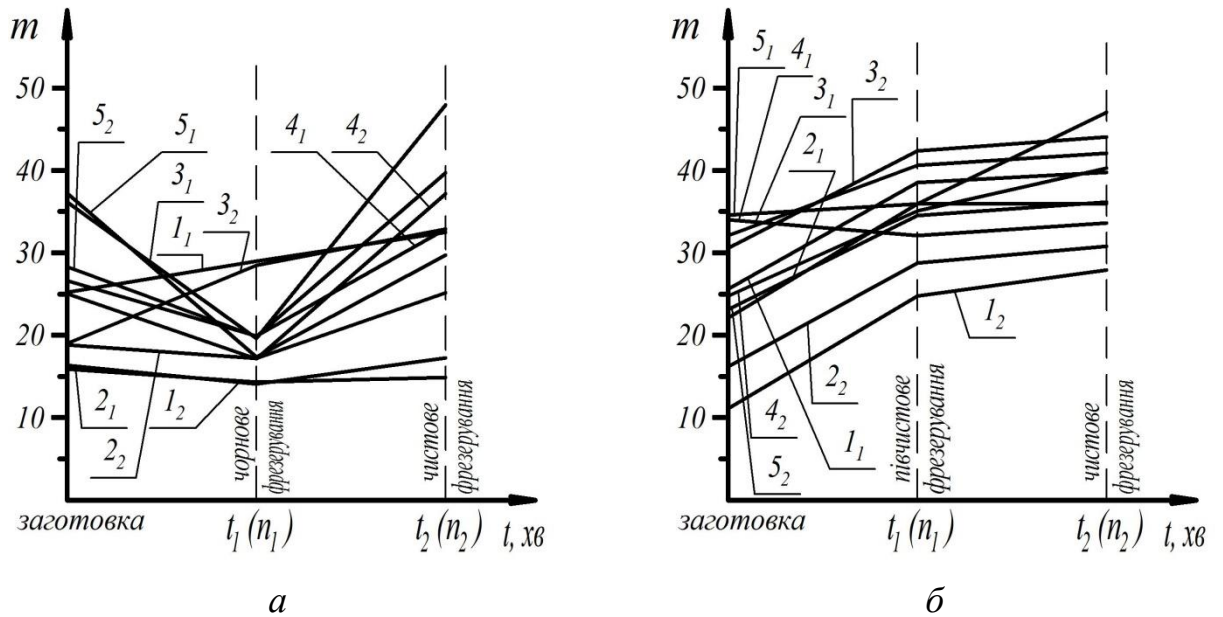


Рис. 3.17. Зміна коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) в поверхневому шарі вилівка у кокіль для першого (а) і другого (б) варіантів технологічного маршруту (1, 2 – заготовки, відлиті у холодні кокілі, 3, 4, 5 – заготовки, відлиті у підігріті кокілі; індекси 1, 2 вказують номер плавки металу)

Розподіл коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) по глибині поверхневого шару матеріалу свідчить про загальну тенденцію у формуванні поверхневого шару матеріалу в процесі заливання металу у холодний і підігрітий кокіль (рис. 3.17-3.18). Встановлено, що в загальному випадку значення коефіцієнта Вейбулла на поверхні заготовки є меншими, а схильність до технологічної пошкоджуваності матеріалу є вищою при заливанні рідкого розплаву у холодні кокілі, ніж у підігріті. Це пояснюється меншим рівнем розвитку неоднорідностей при кристалізації в умовах зменшення температурного поля між металом, який кристалізується, і формою.

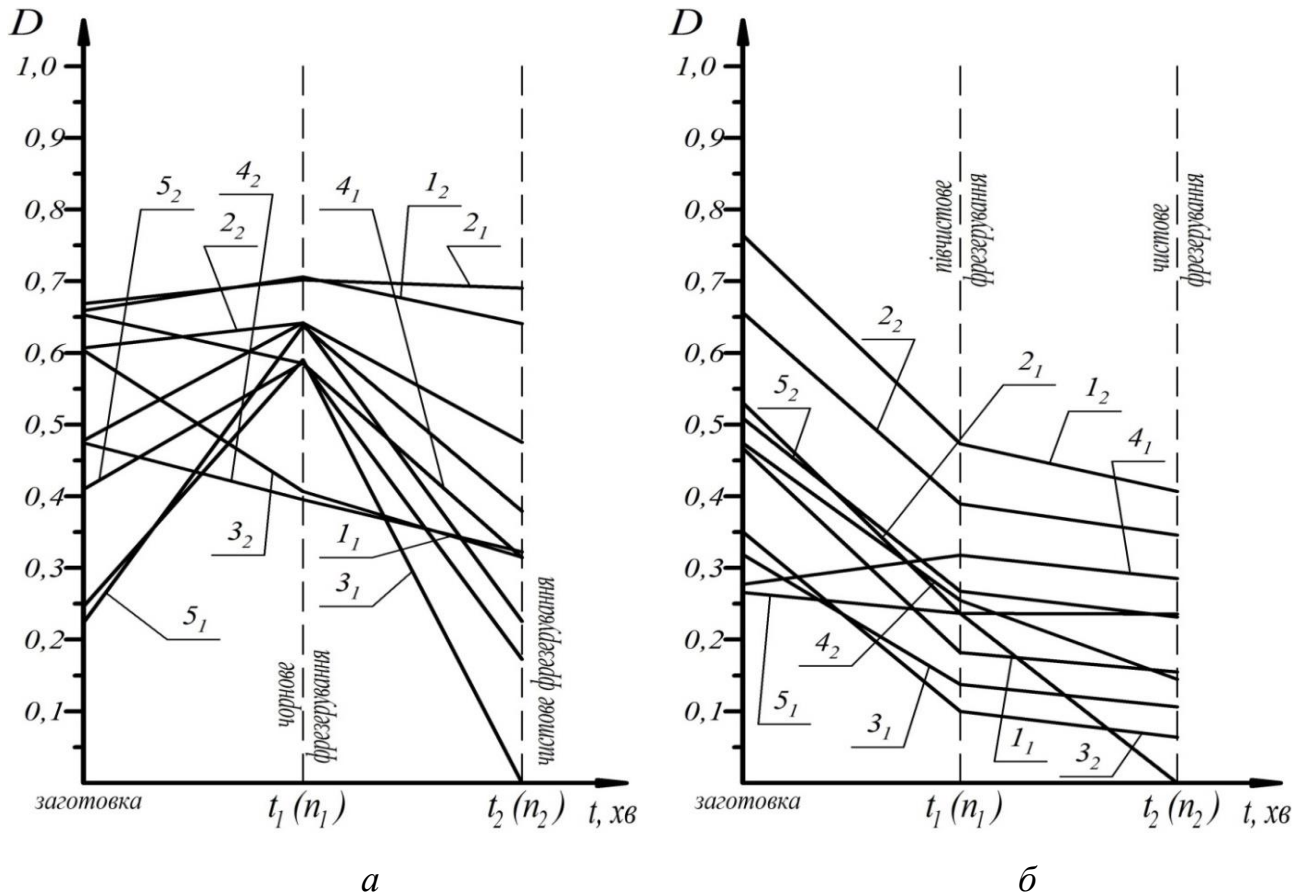


Рис. 3.18. Зміна технологічної пошкоджуваності (D) в поверхневому шарі виливка у кокіль для першого (а) і другого (б) варіантів технологічного маршруту (1, 2 – заготовки, відлиті у холодні кокілі, 3, 4, 5 – заготовки, відлиті у підігріті кокілі; індекси 1, 2 вказують номер плавки металу; $t_1(n_1)$, $t_2(n_2)$, ..., $t_n(n_n)$ – основний (машинний) час для 1, 2, n -го технологічних переходів)

Аналіз результатів, отриманих для 1 варіанту технологічного маршруту (заготовка – чорнова обробка – чистова обробка) після чорнового фрезерування на ширину фрезерування 1 мм, свідчить про зменшення значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і збільшення значень технологічної пошкоджуваності (D) порівняно із аналогічними вимірюваннями на поверхні, що відрізняється від закономірностей формування параметрів якості для сталевих заготовок. Це пояснюється тим, що алюмінієві сплави мають менші значення σ_{02} , σ_B , ніж сталь (зокрема, для сплаву АК21М2,5Н2,5 $\sigma_B=157-186$ МПа, а для сталі 25Л $\sigma_B=412$ МПа, сталі 40Х $\sigma_B=570$ МПа). У зв'язку з цим для чорнового фрезерування алюмінієвих виливок внаслідок

значних силових навантажень і великих значень подач зростають деформації на границях зерен, що призводить до їх окрихчування, і підвищення структурної неоднорідності. Проведення чистового фрезерування після чорного на ширину фрезерування 0,3 мм сприяє зростанню коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) та зменшенню значень технологічної пошкоджуваності (D), що обумовлено зняттям шару металу з розвиненою пошкодженістю при даній обробці (рис. 3.17, а; 3.18, а). Зростання коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) після чистового фрезерування порівняно із відправною заготовкою становить 5,13-49,41%.

На підставі аналізу результатів, отриманих для варіанту технологічного маршруту (заготовка – півчистова обробка – чистова обробка) після півчистового та чистового фрезерування на ширину фрезерування $B=0,3$ мм (після кожного технологічного переходу) встановлено загальну тенденцію до зростання коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і зменшення значень технологічної пошкоджуваності (D) порівняно із аналогічними вимірюваннями на поверхні. При цьому динаміка зміни значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і технологічної пошкоджуваності (D) інтенсивніша для напівчистового фрезерування. Це пояснюється зняттям дефектного поверхневого шару заготовки із прилеглими до нього шарами окислів і бруду (рис. 3.17, б; 3.18, б). Зростання коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) після чистового фрезерування порівняно із відправною заготовкою становить 1,14-60,21 %, що пов'язано із зменшенням пошкоджуваності матеріалу в зоні поля чистової фрезерної обробки.

3.2.4. Проєктування раціональної структури маршруту оброблення поверхонь заготовок у піщано-глинисті форми із алюмінієвих сплавів при аналізі технологічного успадковування їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу

Для виливка у кокіль з алюмінієвого сплаву АК21М2,5Н2,5 з розмірами $165 \times 155 \times 20$ мм, технологічний процес виготовлення якого приведено на рис.

3.4, проаналізовано два варіанти технологічного маршруту оброблення верхньої площини виливка. Перший технологічний маршрут оброблення верхньої площини виливка: чорнове фрезерування кінцевою фрезою; чистове фрезерування кінцевою фрезою. Другий технологічний маршрут оброблення верхньої площини виливка: півчистове фрезерування кінцевою фрезою; чистове фрезерування кінцевою фрезою.

Виливок у піщано-глинисті форми оброблено на універсально-фрезерному верстаті мод. 676 кінцевими фрезами $\varnothing 12$ і $\varnothing 16$ мм. Режими різання при фрезеруванні виливка приведено в табл. 3.11.

Для кращої відтворюваності результатів заплановано дві серії дослідів. Після кожного переходу на верхній поверхні виливка виміряно 30-35 значень твердості на приладі TP5006 за стандартною методикою [29, 38].

Таблиця 3.11

Режими різання при фрезеруванні виливка у піщані форми

| Вид механічної обробки | Елементи режимів різання | | | | |
|------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| | Ширина різання В, мм | Глибина різання t, мм | Подача $S_{хв}$, мм/хв | Частота обертання n, хв ⁻¹ | Швидкість різання V, м/хв |
| чорнова | 2,0 | 12,0 | 255 | 515 | 26,39 |
| півчистова | 2,0 | 16,0 | 13 | 1050 | 52,78 |
| чистова | 2,0 | 16,0 | 13 | 1050 | 52,78 |

За отриманими даними розраховано показники КОМ: коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m) для обох технологічних маршрутів за формулами (1.29)-(1.31). За результатами експериментальних досліджень побудовано графіки залежності $m=f(h)$ після механічного оброблення (рис. 3.19).

В результаті аналізу результатів на поверхні, отриманої після почергових чорнового та напівчистового фрезерування на ширину фрезерування $B=2$ мм (для кожного технологічного переходу), встановлено менше значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), що пов'язано із зростанням пошкоджуваності матеріалу в деформаційній зоні обробленого шару (рис. 3.19, а).

Дослідження заготовок, почергово оброблених півчистовим і чистовим фрезеруванням під час різання на ширину фрезерування $B=2$ мм (для кожного технологічного переходу) свідчать про зростання в 1,5-3,0 рази значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла, що пов'язано із зменшенням пошкоджуваності матеріалу в зоні поля чистового фрезерного оброблення (рис. 3.19, б). Поряд з тим, продуктивність для чорнового фрезерування є у 19,6 разів вищою, ніж для чистового.

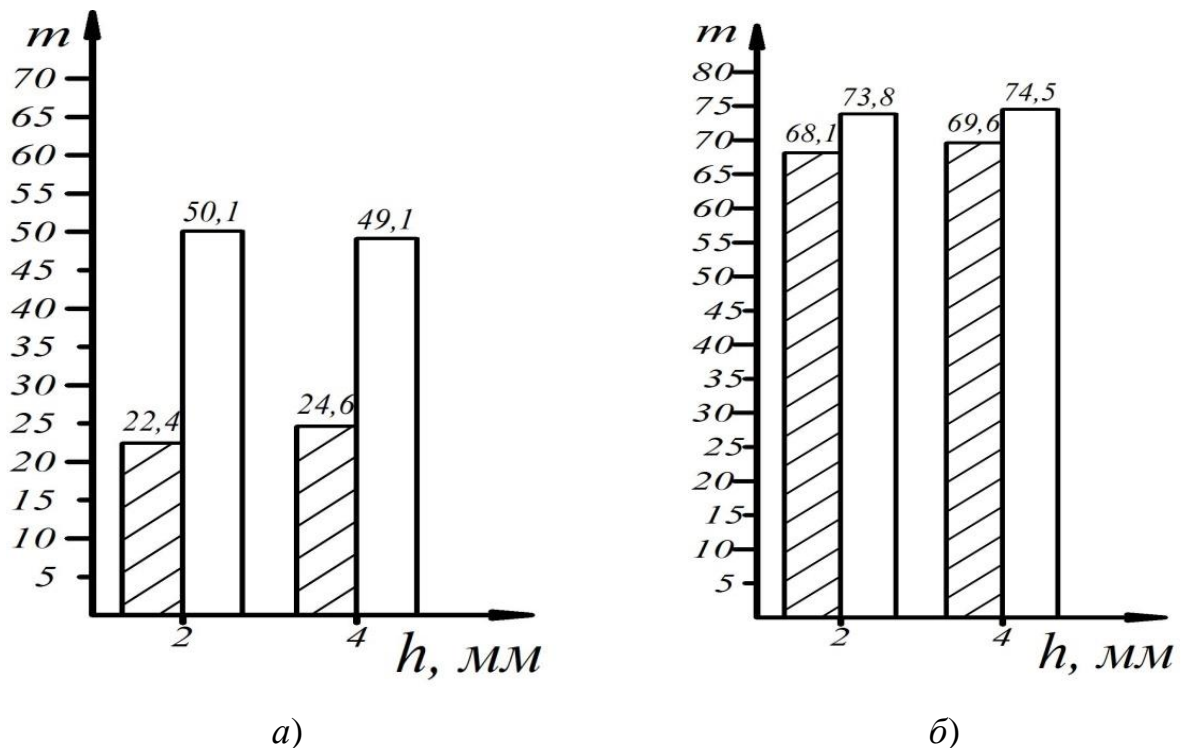


Рис. 3.19. Зміна коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) в поверхневому шарі вилівка для першого – а) і другого – б) маршруту оброблення плоскої поверхні

На підставі аналізу рис. 3.19 зроблено висновок, що технологічний маршрут оброблення площини: заготовка – напівчистове фрезерування – чистове фрезерування є пріоритетнішим за технологічний маршрут: заготовка – чорнове фрезерування – напівчистове фрезерування з огляду на динаміку зростання показників КОМ: коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) та суттєво менше розсіювання значень для двох серій дослідів, що свідчить про кращу впорядкованість структури матеріалу та меншу його пошкоджуваність.

3.2.5. Дослідження впливу основного технологічного обладнання та інструменту на технологічне успадковування параметрів поверхневого шару і матеріалу алюмінієвих виливок у піщано-глинисті форми при аналізі технологічного успадковування їхніх параметрів за критерієм однорідності матеріалу

Для експериментальних досліджень використано виливок у піщано-глинисті форми із розмірами 165×155×20 мм, технологічний процес виготовлення якого приведено на рис. 3.4. Поверхню виливка оброблено кінцевим фрезеруванням. Для експериментальних досліджень використано кінцеві фрези для чорнового (табл. 3.12) та напівчистового (табл. 3.13) фрезерування фірми «Sandvik» Ø 6–12 мм. Експериментальний зразок оброблено на вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL.

Таблиця 3.12

Конструктивні та геометричні параметри кінцевих фрез для чорнового оброблення

| Конструктивний/ геометричний параметр фрези | Позначення фрези | | | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 1P240-0600- ХА 1630 | 1P240-0800- ХА 1630 | 1P240-1000- ХА 1630 | 1P240-1200- ХА 1630 |
| Конструктивні параметри, мм | | | | |
| Номінальний діаметр | 6,00 | 8,00 | 10,00 | 12,00 |
| Діаметр різання | 5,74 | 7,74 | 9,60 | 11,60 |
| Функціональна довжина | 57,00 | 63,00 | 72,00 | 83,00 |
| Робоча довжина | 13,50 | 19,50 | 22,50 | 26,50 |
| Розмір фаски | 0,13×45° | 0,13×45° | 0,2×45° | 0,2×45° |
| Число різальних кромок | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Геометричні параметри, ° | | | | |
| Кут врізання (max) | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Головний передній кут (радіальний/осьовий) | 9/5,5 | 9/5,5 | 9/5,5 | 9/5,5 |
| Кут підйому рівця | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Сплав: основа/покриття | 1630: HC/PVDALCRN | | | |
| Точність | h6 | | | |

Проведено дві серії досліджень для різновидів механічної обробки експериментальних зразків. Спочатку визначені поверхні експериментального зразка оброблено фрезеруванням начорно почергово чотирма кінцевими фрезами для напівчистового фрезерування. На наступному етапі визначені

поверхні зразка оброблено напівчисто чотирма кінцевими фрезами для чорнового фрезерування. Для реального виробництва фрези для чорнового фрезерування застосовують для попередньої (чорнової) обробки заготовки, фрези для напівчистового фрезерування – для проміжної обробки між чорновим та чистовим фрезеруванням.

Таблиця 3.13

Конструктивні та геометричні параметри кінцевих фрез для напівчистового оброблення

| Конструктивний/ геометричний параметр фрези | Позначення фрези | | | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 1P330-0600- ХА 1620 | 1P330-0800- ХА 1620 | 1P330-1000- ХА 1620 | 1P330-1200- ХА 1620 |
| Конструктивні параметри, мм | | | | |
| Номінальний діаметр | 6,00 | 8,00 | 10,00 | 12,00 |
| Діаметр різання | 5,80 | 7,80 | 9,80 | 11,80 |
| Функціональна довжина | 57,00 | 63,00 | 72,00 | 83,00 |
| Робоча довжина | 10,00 | 16,00 | 19,00 | 22,00 |
| Розмір фаски | 0,1×45° | 0,1×45° | 0,1×45° | 0,1×45° |
| Число різальних кромок | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Геометричні параметри, ° | | | | |
| Кут врізання (max) | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Головний передній кут (радіальний/осьовий) | 10,5/13,5 | 10,5/13,5 | 10,5/13,5 | 10,5/13,5 |
| Кут підйому рівця | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Сплав: основа/покриття | 1620: HC/PVD TIALN | | | |
| Точність | h6 | | | |

Режими різання вибрано відповідно до рекомендацій виробника інструменту для визначеного технологічного обладнання.

Згідно рекомендацій фірми «Sandvik» прийнято такі параметри різання: для \varnothing 6 мм: $V=3,0$ мм, $t = 6,0$ мм, $Sz = 0,1$ мм/зуб, $n = 3100$ хв⁻¹, $V = 58,43$ м/хв; для \varnothing 8 мм: $V=3,0$ мм, $t = 8,0$ мм, $Sz = 0,1$ мм/зуб, $n = 4000$ хв⁻¹, $V = 100,53$ м/хв; для \varnothing 10 мм: $V=3,0$ мм, $t = 10,0$ мм, $Sz = 0,1$ мм/зуб, $n = 5800$ хв⁻¹, $V = 182,21$ м/хв; для \varnothing 12 мм: $V=3,0$ мм, $t = 12,0$ мм, $Sz = 0,1$ мм/зуб, $n = 5800$ хв⁻¹, $V = 218,66$ м/хв.

Оброблення здійснено при одному встановленні заготовки для одного переходу при обробленні кінцевими фрезами (рис. 3.20).

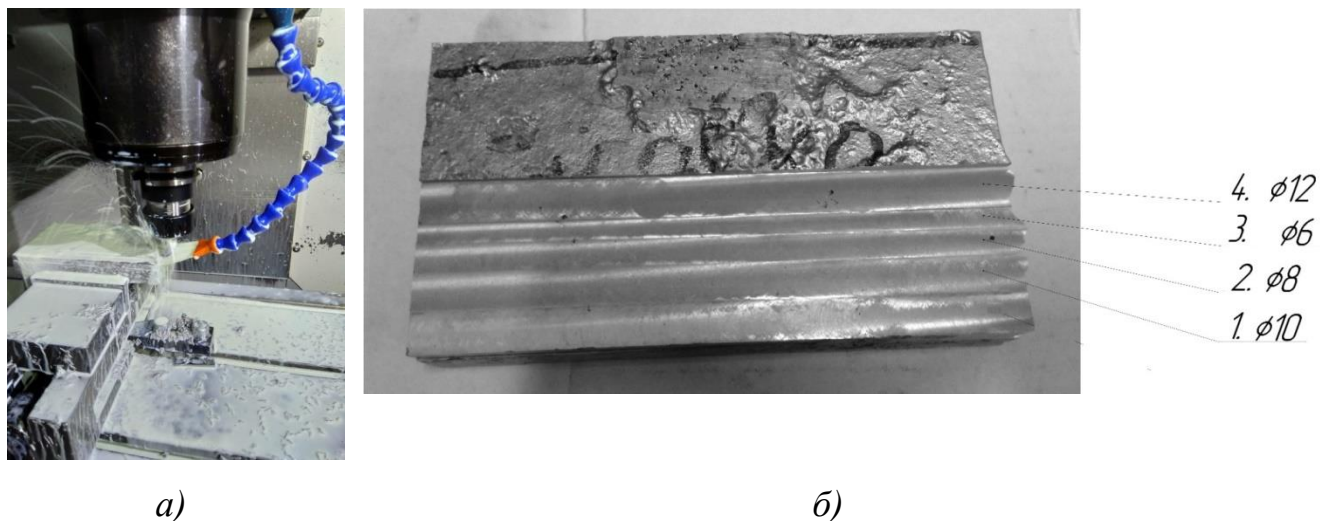


Рис. 3.20. Оброблення заготовки кінцевими фрезами $\varnothing 6$ мм, $\varnothing 8$ мм, $\varnothing 10$ мм, $\varnothing 12$ мм *a)* і поверхня призматичної заготовки *б)* після обробки

Після кожного переходу здійснено контроль верхньої поверхні вилівка на приладі TP5006 за стандартною методикою (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Контроль однорідності поверхневого шару заготовки методом LM-твердості

Показники КОМ: коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m) після кожного оброблення розраховано за формулами (1.29)-(1.31), константи матеріалу – за формулою (2.21), технологічну пошкоджуваність D – за формулою (2.25), інтенсивність зростання зростання пошкоджуваності j_D – за формулою (2.26) у середовищі Mathcad 15 за результатами досліджень (табл. 3.14).

Графік $m=f(d)$ представлено на рис. 3.22.

Таблиця 3.14

Значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і технологічної пошкоджуваності D після двох серій експериментальних досліджень

| Діаметр кінцевої фрези d , мм | Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) | | Константа матеріалу A_m | |
|---------------------------------|--|----------------------|---|----------------------|
| | після першої обробки | після другої обробки | після першої обробки | після другої обробки |
| 6 | 51,70 | 63,11 | 0,974 | 0,979 |
| 8 | 46,98 | 66,84 | 0,971 | 0,980 |
| 10 | 25,26 | 63,34 | 0,948 | 0,979 |
| 12 | 18,15 | 34,42 | 0,929 | 0,961 |
| Діаметр кінцевої фрези d , мм | Технологічна пошкоджуваність D | | Інтенсивність зростання пошкоджуваності j_D | |
| | після першої обробки | після другої обробки | після першої обробки | після другої обробки |
| 6 | 0,23 | 0,06 | 0,29 | 0,06 |
| 8 | 0,3 | 0 | 0,42 | 0 |
| 10 | 0,62 | 0,05 | 1,65 | 0,055 |
| 12 | 0,73 | 0,49 | 2,68 | 0,94 |

Збільшення швидкості різання із $V_{різ.}=58,43$ м/хв до $V_{різ.}=218,65$ м/хв при обробленні кінцевими фрезами для напівчистового фрезерування (рис. 3.22) при однакових подачі на зуб і ширині різання характеризується зменшенням коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) і збільшенням технологічної пошкоджуваності матеріалу D після чорнового фрезерування. Після напівчистового фрезерування при тих самих значеннях $V_{різ.}$ коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) збільшується у 1,22-2,51 рази, причому динаміка зміни підвищується із збільшенням діаметра фрези \varnothing 6–10 мм. Для \varnothing 6–10 мм відбувається стабілізація коефіцієнта гомогенності після напівчистового фрезерування, що пояснюється зрізанням дефектного шару матеріалу після

першого фрезерного оброблення. Однак для $\varnothing 12$ мм динаміки зміни коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) зменшується. Порівняно з чорновим фрезеруванням значення (m) збільшується у 1,9 рази, що є меншим відносно такого ж показника для фрези $\varnothing 10$ мм (2,51 рази).

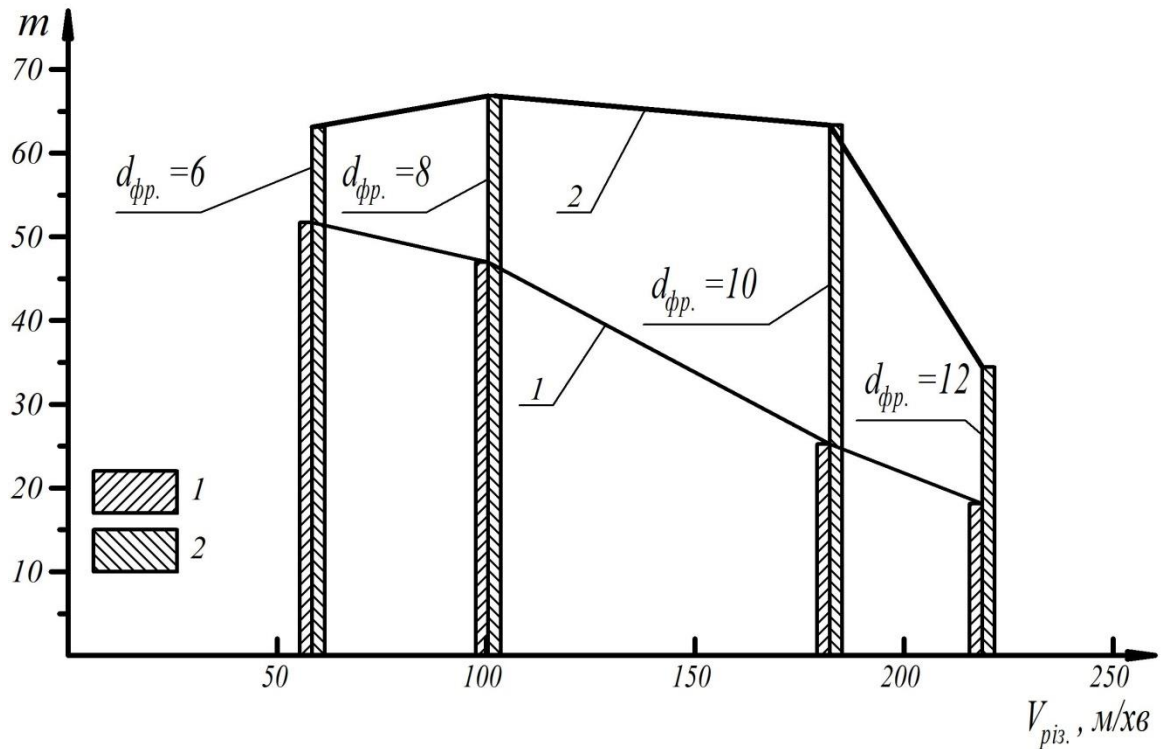


Рис. 3.22. Зміна коефіцієнта гомогенності Вейбулла m (a) від швидкості різання $V_{різ.}$ при фрезеруванні : 1 – після чорнового фрезерування; 2 – після напівчистового фрезерування кінцевими фрезами фірми «Sandvik»

Поверхневий шар проаналізовано за допомогою технологічної пошкоджуваності D як характеристики КОМ, оскільки в трьох з чотирьох типорозмірів фрез значення вимірних величин стабілізовано після другої обробки.

На рис. 3.23 приведено динаміку зміни констант матеріалу A_m та технологічної пошкоджуваності D при чорновому та напівчистовому фрезеруванні заготовки з алюмінієвого сплаву. Збільшення швидкості різання із $V_{різ.}=58,43$ м/хв до $V_{різ.}=218,65$ м/хв для чорнового фрезерування напівчистовими кінцевими фрезами визначається зменшенням величини константи матеріалу A_m з 0,974 до 0,929 та зростанням технологічної

пошкоджуваності D у 3,17 разів. Зменшення значення константи матеріалу A_m та зростання технологічної пошкоджуваності D пояснюється збільшенням питомої площі контакту металорізального інструменту із оброблюваною поверхнею та наявністю великої кількості дефектів у поверхневому шарі вхідної заготовки.

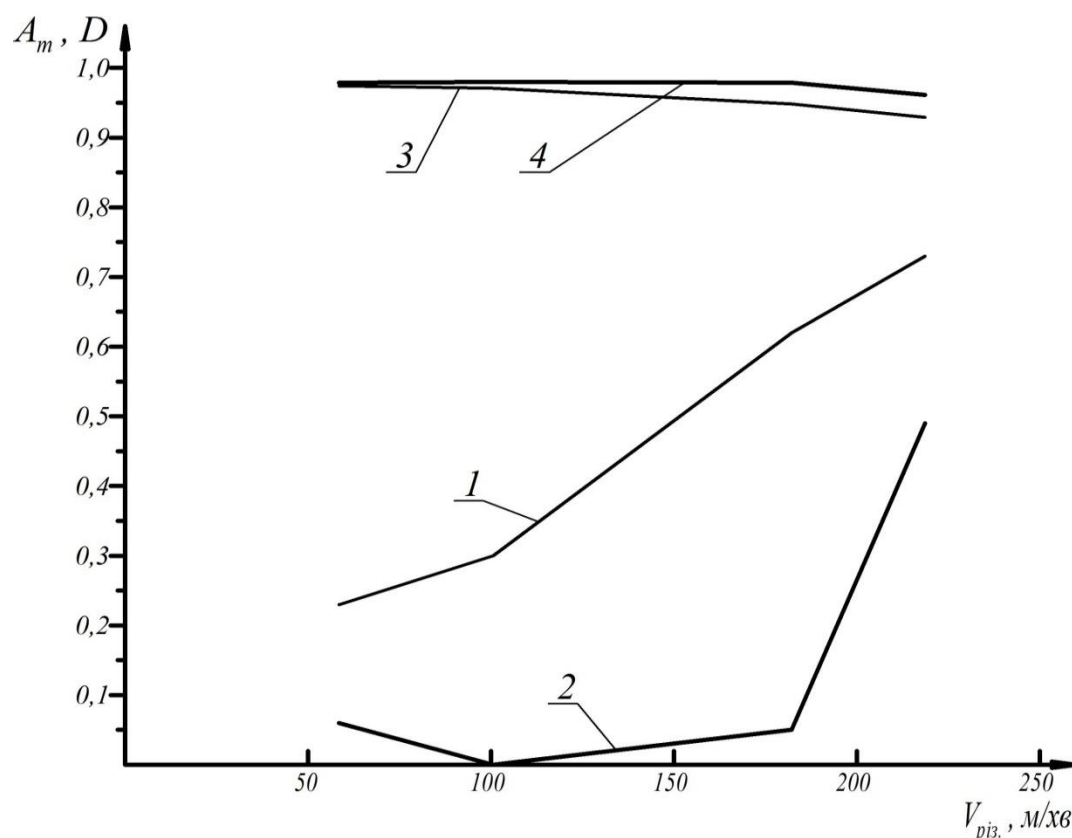


Рис. 3.23. Зміна технологічної пошкоджуваності D від швидкості різання $V_{риз.}$ при фрезеруванні: 1 – після першої обробки; 2 – після другої обробки та константи матеріалу A_m : 3 – після першої обробки; 4 – після другої обробки фрезерування кінцевими фрезами фірми «Sandvik»

Після напівчистового фрезерування чорновими кінцевими фрезами \varnothing 6–10 мм при тих самих значеннях $V_{риз.}$ константа матеріалу стабілізується ($A_m=0,979-0,980$), а технологічна пошкоджуваність D зменшується практично до нуля. Поряд з тим напівчистове фрезерування кінцевими фрезами \varnothing 12 супроводжується зменшенням технологічної пошкоджуваності D в 1,49 рази, збільшенням константи матеріалу A_m з 0,929 до 0,96, що визначається

зменшенням кількості технологічних дефектів після попереднього чорнового оброблення.

На рис. 3.24 приведено динаміку зміни інтенсивності зростання пошкоджуваності j_D при чорновому та напівчистовому фрезеруванні заготовки з алюмінієвого сплаву.

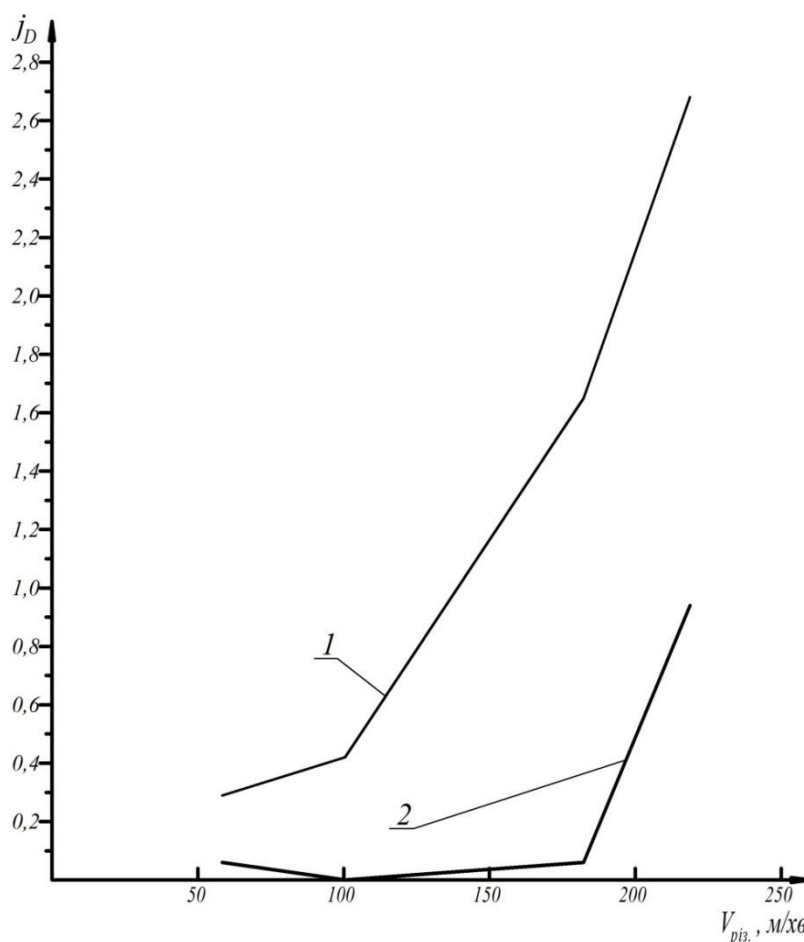


Рис. 3.24. Зміна інтенсивності зростання пошкоджуваності j_D від швидкості різання $V_{риз.}$ при фрезеруванні: 1 – після першої обробки; 2 – після другої обробки кінцевими фрезами фірми «Sandvik»

Збільшення швидкості різання із $V_{риз.}=58,43$ м/хв до $V_{риз.}=218,65$ м/хв для чорнового фрезерування напівчистовими кінцевими фрезами характеризується зростанням інтенсивності пошкоджуваності j_D у 9,24 рази, що пояснюється збільшенням питомої площі контакту металорізального інструменту із оброблюваною поверхнею та наявністю значної кількості структурних недосконалостей матеріалу у поверхневому шарі вхідної заготовки. Після

напівчистої обробки чорновими кінцевими фрезами \varnothing 6–10 мм при тих самих значеннях V_{piz} . параметр j_D зменшується практично до нуля. Поряд з тим напівчистове фрезерування кінцевими фрезами \varnothing 12 супроводжується зменшенням інтенсивності пошкоджуваності j_D в 2,85 разів, що забезпечується зменшенням кількості технологічних дефектів після попереднього чорнового оброблення.

3.3. Висновки розділу 3

1. Відповідно до прийнятого типу та форми організації виробництва, номенклатури деталей машин системи аналізу формоутворення виробу – PSPAS-системи інтегрується у автоматизовану систему аналізу формоутворення виробу САF-системи при виготовленні виробів або використовується як незалежний елемент у структурі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва. При забезпеченні технологічного успадковування параметрів якості виробу за характеристиками його матеріалу підлягає розробленню підсистема аналізу технологічного успадковування за характеристиками матеріалу виробу (PSPAS-TIM), що підпорядковується підсистемі аналізу технологічного успадковування при формоутворенні виробу (PSPAS-TI) та її складові: підсистема аналізу гомогенності матеріалу відповідно вхідної заготовки (PSPAS-TIHMB) і при формоутворенні виробу (PSPAS-TIHMW).

2. Критерієм оптимізації при виборі раціональної заготовки при невідомому розподілу коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у матеріалі виробу по глибині (товщині) заготовки є середнє із максимальних значень коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), розрахованих у лімітуючих перерізах досліджуваної заготовки. Критерієм оптимізації при виборі раціонального маршруту оброблення виконавчих і базових поверхонь виробу при невідомому розподілу коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у матеріалі виробу по глибині

(товщині) заготовки є зростання коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) від заготовки до деталі із найбільшим значенням коефіцієнта (m) для останнього переходу, що забезпечує найменшу схильність до технологічної пошкоджуваності.

3. При розробленні підсистем аналізу гомогенності матеріалу вхідної заготовки (PSPAS-TIHMB) і аналізу гомогенності матеріалу при формоутворенні заготовки виробу (PSPAS-TIHMW), які входять до підсистеми аналізу технологічного успадкування за характеристиками матеріалу виробу (PSPAS-TIM), встановлено, що параметри деталі формуються в процесі технологічного успадкування властивостей матеріалу заготовки в результаті технологічних обробок. Наприклад, експериментально встановлено, що при механічному обробленні валів 6E4-2717.00.00.01 із сортового прокату (матеріал – сталь 40X ГОСТ 4543-71) і виливків кронштейнів підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса (матеріал – сталь 25Л ГОСТ 977-88) вхідні заготовки характеризуються неоднорідністю структури їхніх поверхневих шарів. На підставі статистичного опрацювання результатів досліджень значення коефіцієнти гомогенності Вейбулла (m) дорівнюють відповідно $m=6,123-11,457 \rightarrow 0$ для вала і $m=4,337-6,011 \rightarrow 0$ для кронштейна, що відповідає стану структурно-неоднорідного матеріалу. Константи матеріалу A_m , які пов'язані з коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m), дорівнюють відповідно для сталі 40X ГОСТ 4543-71 $A_m=0,814-0,892$ і для сталі 25Л ГОСТ 977-88 $A_m=0,756-0,812$, що не перевищують значення 0,9.

4. При дослідженні алюмінієвих виливок у кокіль встановлено зростання значення коефіцієнта Вейбулла при формоутворенні виливків в умовах зменшення температурного поля між металом, який кристалізується, і формою. Це пояснюється меншим рівнем розвитку неоднорідностей в умовах кристалізації. Проте на відміну від сталевих заготовок для виливків у кокіль із

алюмінієвого сплаву АК21М2,5Н2,5 ГОСТ 1853-93 значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла для алюмінієвого виливка у кокіль є вищими $m=17,373-32,776$, що відповідає стану структурно-однорідного матеріалу. Поряд з тим константи матеріалу заготовки $A_m=0,926-0,959$ перевищують 0,9, що характеризують вищу впорядкованість структури поверхневих шарів алюмінієвих заготовок, ніж сталевих.

5. Встановлено, що технологічне успадковування властивостей матеріалу при механічному обробленні сталевих виробів із використанням принципу функціонально-орієнтованого проектування забезпечує перетворення структурно-неоднорідного матеріалу заготовок у структурно-однорідний матеріал готових виробів, що підтверджується збільшенням значень коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) і констант матеріалу A_m . Поряд з тим 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 .

6. При механічному обробленні валів 6Е4-2717.00.00.01 методами лезової та абразивної обробок змінюються константи матеріалу у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – вихідна деталь» $A_m=0,814-0,966$, при цьому вище розсіювання значень констант має місце для заготовки та чорнових технологічних переходів із стабілізацією величин констант для фінішних обробок. Це свідчить про вищу однорідність структури після фінішних обробок порівняно із чорновими методами оброблення поверхонь та підтверджує відомі закономірності 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. Чистові методи лезової

обробки для технологічних маршрутів 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 пошкоджуваності у процесі експлуатації.

7. При дослідженні алюмінієвих виливок у кокіль встановлено зростання значення коефіцієнта Вейбулла в процесі формоутворення виливків в умовах зменшення температурного поля між металом, який кристалізується, і формою, що пояснюється меншим рівнем розвитку неоднорідностей в умовах кристалізації. Аналіз технологічного маршруту: заготовка – чорнове фрезерування – чистове фрезерування свідчить, що після чорнкової обробки на ширину фрезерування 1 мм поверхневий шар характеризується малими значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m); це пов'язано із зростанням пошкоджуваності матеріалу в деформаційній зоні обробленого шару. Проведення чистового фрезерування після чорнового на ширину фрезерування 0,3 мм сприяло зростанню коефіцієнта гомогенності Вейбулла, що обумовлено зняттям шару металу з розвиненою пошкоджуваністю при даній обробці. Зростання коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) після чистового фрезерування порівняно із відправною заготовкою становить 5,13-49,41%. Дослідженнями технологічного маршруту: заготовка – напівчистове фрезерування – чистове фрезерування встановлено, що після почергового оброблення півчистовим і чистовим фрезеруванням на ширину фрезерування $B=0,3$ мм (після кожного технологічного переходу) значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла зростають. Це пов'язано із зменшенням пошкоджуваності матеріалу в зоні поля чистової фрезерної обробки. Зростання коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) після чистового фрезерування порівняно із відправною заготовкою становить 1,14-60,21%, що пов'язано із

зменшенням пошкоджуваності матеріалу в зоні поля чистової фрезерної обробки.

8. Проведено дослідження інтенсивності (густини) технологічних дефектів у поверхневому шарі для алюмінієвого виливка у піщано-глинисті форми на електронному мікроскопі ZEISS EVO 40XVP. Встановлено, що найбільша кількість технологічних пошкоджень у виливку утворюється на глибині до 2 мм від поверхні, що формують у останню чергу. Це пов'язано із специфікою процесу затверднення металу, наявністю домішок і неоднорідностей у поверхневому шарі та підтверджується малими значеннями коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), а також великими значеннями пошкоджуваності D . При подальшому переміщенні вглиб матеріалу (від 2 до 4 мм) спостерігається зменшення технологічної пошкоджуваності. На відстані 4–6 мм технологічна пошкоджуваність суттєво зменшується. Технологічні дефекти присутні у всіх досліджуваних зонах матеріалу. Однак, якщо у приповерхневій зоні є одиничні пори розміром 1,5 мм, то в інших зонах розмір пор не перевищує 0,22–0,27 мм. На більшу кількість ливарних пошкоджень вказує і відносна дефектність структури P , яка у приповерхневій зоні є більшою майже в 10 разів порівняно із іншими зонами. Спектральний аналіз показав підвищення вмісту кисню та зменшення алюмінію у приповерхневій частині виливка порівняно з нижньою частиною. Розподіл кремнію, міді, хрому, цинку та заліза у всіх зонах загалом є рівномірним.

9. В процесі чорнового фрезерування кінцевими фрезами для напівчистової обробки фірми «Sandvik» \varnothing 6–12 мм та напівчистового фрезерування кінцевими фрезами для чорнової обробки фірми «Sandvik» відповідного діаметра на вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL досліджено вплив режимів обробки на характеристики однорідності матеріалу поверхневого шару. Збільшення швидкості різання із

$V_{\text{різ.}}=58,43$ м/хв до $V_{\text{різ.}}=218,65$ м/хв при обробленні кінцевими фрезами для напівчистового фрезерування при однакових подачі на зуб і ширині різання характеризується зменшенням коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), зменшенням величини константи матеріалу A_m з 0,974 до 0,929 та зростанням технологічної пошкоджуваності D у 3,17 разів. Після напівчистового фрезерування при тих самих значеннях $V_{\text{різ.}}$ коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) збільшується у 1,22-2,51 рази, константа матеріалу стабілізується ($A_m=0,979-0,980$), а технологічна пошкоджуваність D зменшується практично до нуля. Для \varnothing 6–10 мм відбувається стабілізація коефіцієнта гомогенності після напівчистового фрезерування, що пояснюється зрізанням дефектного шару матеріалу після першого фрезерного оброблення. Однак для \varnothing 12 мм динаміки зміни коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) зменшується. Порівняно з першою обробкою значення (m) збільшується у 1,9 рази, що є меншим відносно такого ж показника для фрези \varnothing 10 мм (2,51 рази). Поряд з тим напівчистове оброблення кінцевими фрезами \varnothing 12 супроводжується зменшенням технологічної пошкоджуваності D в 1,49 рази, збільшенням константи матеріалу A_m з 0,929 до 0,96, що визначається зменшенням кількості технологічних дефектів після попереднього чорнового оброблення.

РОЗДІЛ 4.
ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ ЯК РЕЗУЛЬТАТ РОБОТИ
ПІДСИСТЕМ PSPAS–СИСТЕМИ
(PRODUCT SHAPING/PROCESSING ANALYSIS SYSTEM)

Вдосконалення формоутворюючої PSPAS-системи під час виготовлення машинобудівних виробів (рис. 2.7) здійснюється не лише у напрямку дослідження підсистеми аналізу технологічного успадковування при формоутворення виробів і її різновидів на різних ієрархічних рівнях, а й розроблення підсистем, що реалізують процеси перетворення властивостей заготовок виробів за рахунок почергового або комплексного впливу декількох технологічних обробок. На даному етапі розвитку машинобудування підвищення ефективності застосування принципу ФОП в процесі виготовлення деталей машин забезпечується саме розробленням і впровадженням комбінованих і гібридних методів технологічних оброблень машинобудівних виробів, що забезпечують поряд з дотриманням регламентованих параметрів якості їх поверхонь також підвищення їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності.

4.1. Дослідження методів визначення експлуатаційних характеристик виконавчих (функціональних) поверхонь машинобудівних виробів

Інтенсифікація робочих навантажень машинобудівних виробів підвищує вимоги до забезпечення їхніх експлуатаційних характеристик: зносостійкості, втомної міцності, тримкої стійкості тощо.

Оскільки в даній дисертаційній роботі досліджуються технологічні процеси виготовлення деталей машин, що працюють в умовах силових навантажень і інтенсивного зношування, тому аналізується технологічне забезпечення зносостійкості машинобудівних виробів.

4.1.1. Математичні моделі зносостійкості під час виготовлення машинобудівних виробів

З огляду на те, що знос є характерною та поширеною причиною відмов деталей машин, розроблення методів забезпечення зносостійкості є пріоритетним завданням для сучасного машинобудування.

Прогнозування зносостійкості відповідно до визначених експлуатаційних умов на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва дозволяє керувати цією експлуатаційною характеристикою на стадії розроблення машинобудівного виробу у його життєвому циклі. Явища тертя та зношування спряжених металевих поверхонь визначаються пружним або пластичним відтисненням матеріалу, мікрорізнанням, руйнування окисних плівок або руйнування основного матеріалу в результаті адгезії. Врахування усіх факторів у математичному описі фізичного процесу ускладнює розроблювані моделі та математичний апарат для їхнього аналізу. Тому на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва для опису зношування спряжених поверхонь використовуються спрощені математичні моделі за рахунок певних припущень, що допускається у машинобудівній практиці.

Встановлено, що експлуатаційні умови визначають домінуючий вид тертя, що призводить до найбільшої інтенсивності зношування (I_h) виконавчої поверхні. Умова домінуючості визначального виду тертя для заданих експлуатаційних умов є необхідною, але недостатньою. Додаткова умова характеризує кінетику руйнування спряжених поверхонь: при сталому зношуванні інтенсивність руйнування спряжених поверхонь не повинна перевищувати швидкості процесу, що визначає вид зношування [279]:

$$I_{руйн.} \leq I_{hmax}, \quad (4.1)$$

де $I_{руйн.}$ – інтенсивність руйнування матеріалу спряжених поверхонь деталей машин; I_{hmax} – найбільша інтенсивність зношування виконавчої поверхні.

За умови граничного значення інтенсивності руйнування матеріалу спряжених поверхонь деталей та визначення домінуючого і супутніх видів зношування залежність (4.1) має вигляд [279]:

$$\exists I_{hj} \rightarrow \forall (I_{h_абр.}; I_{h_втомн.}; I_{h_схопл.}; I_{h_тепл.}) \leq [I_{руйн.}], \quad (4.2)$$

де $I_{руйн.}$ – інтенсивність руйнування матеріалу спряжених поверхонь деталей машин; $I_{h_абр.}$; $I_{h_втомн.}$; $I_{h_схопл.}$; $I_{h_тепл.}$ – інтенсивність відповідно абразивного, втомного зношування, схоплювання 1-го і 2-го роду тощо.

Труднощі такого підходу полягають у складності адекватної формалізації математичних моделей, що пов'язують характеристики якості поверхні і технологічних параметрів оброблення із показниками зносостійкості; проведенні експериментальних досліджень для підтвердження результатів математичного моделювання. Поряд з тим необхідно постійно розширювати базу даних та базу знань для забезпечення широкої номенклатури виробів і матеріалів.

Іншим підходом у дослідженні зносостійкості поверхонь є розрахунок параметрів кривої Аббота за результатами характеристик поверхневого шару виробу.

Геометрія поверхні при технологічному обробленні (різання, абразивне оброблення, ППД) формується в результаті сумарного впливу періодичних факторів із накладеними на них випадковими збуреннями [154]. При цьому систематична (періодична) складова визначається видом оброблення, кінематикою формоутворення, профілем різальних кромek металорізального інструменту тощо. Випадкова складова забезпечується фізичними явищами та процесами пластичного деформування матеріалу під час його оброблення (наростоутворення, сколювання тощо). Домінування однієї або іншої складової формує випадково або періодично розташовані нерівності [130].

Частку випадкової складової оцінюють коефіцієнтом випадковості [103]:

$$\gamma_C = \frac{Rq_\gamma^2}{Rq^2}, \quad (4.3)$$

де Rq_γ – середнє квадратичне відхилення випадкової складової профіля; Rq – середнє квадратичне відхилення всього профіля.

Крива Аббота є найважливішою топографічною характеристикою мікрогеометрії, що представляє собою інтегральну криву із характеристикою

розподілу матеріалу по висоті шорсткого шару. В частковому випадку, при випадковому розподілі матеріалу ($\gamma_c \geq 0,7$ [103]) опорну криву представляють у вигляді [120, 265]:

$$\eta_s = \frac{l}{2} [1 - \Phi(t)], \quad (4.4)$$

де $\Phi(t)$ – інтервал ймовірності, що має вигляд

$$\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \ell^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (4.5)$$

де $t = \frac{x}{Rq}$ – відношення відстані перерізу від середньої площини до середньої квадратичної висоти нерівностей.

Прийнявши для нормального розподілу

$$y = \frac{Rmax}{2} - x \quad (4.6)$$

при

$$x = Rq \cdot t \quad (4.7)$$

$$\sigma = \frac{Rq}{Rmax}, \quad (4.8)$$

отримаємо [120]:

$$\eta_s = \frac{l}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{l - 2 \cdot \varepsilon}{2 \cdot \sigma} \right) \right], \quad (4.9)$$

Вираз (4.9) не дозволяє виразити кількісно його складові та характеризує розподіл матеріалу у досліджуваному поверхневому шарі згідно закону Гауса, що не завжди є закономірним [120].

Початкова частина кривої Аббота апроксимується простою степеневою залежністю [119]:

$$\eta_s = b \cdot \left(\frac{p}{R_t} \right)^v = tm \left(\frac{p}{Rp} \right)^v, \quad (4.10)$$

де p – відстань від лінії виступів до розглядуваного перерізу.

При допущенні

$$\varepsilon_{max} = \frac{p}{R_{max}}, \quad (4.11)$$

$$\varepsilon = \frac{p}{Rp} \quad (4.12)$$

і підстановці (4.11), (4.12) у (4.10), отримано залежність:

$$\eta_s = b \cdot \varepsilon_{max}^v = tm\varepsilon^v, \quad (4.13)$$

Параметри v , b визначаються на підставі характеристик отриманих профілограм поверхні.

Для початкової частини кривої Аббота ($p \leq Rp$ (рис. 4.1); $0 \leq \varepsilon_{max} \leq 0,5$) [120]:

$$v = 2 \cdot tm \cdot \left(\frac{Rp}{Ra} \right) - 1, \quad (4.14)$$

$$b = tm \cdot \left(\frac{R_{max}}{Rp} \right)^v. \quad (4.15)$$

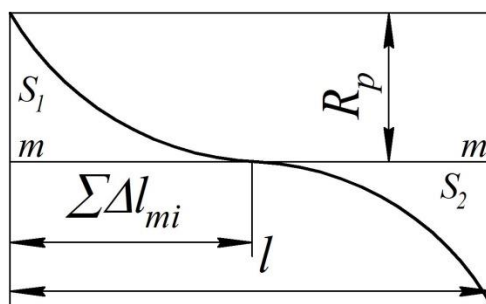


Рис. 4.1. Схема для розрахунку параметрів кривої Аббота v , b

Для іншої частини кривої Аббота, розташованої нижче середньої лінії ($p > Rp$ (рис. 4.1), отримано математичну залежність:

$$\eta_s = 1 - (1 - tm) \left(\frac{R_{max} - p}{R_{max} - Rp} \right)^{\frac{2 \cdot (1 - tm) \cdot (R_{max} - Rp) - 1}{Ra}}, \quad (4.16)$$

4.1.2. Дослідження впливу елементів системи ВПД на формування експлуатаційних характеристик виробів

Для експериментальних досліджень використано виліток у піщано-глинисті форми із розмірами $165 \times 155 \times 20$ мм (п. 3.2.5). Механічну обробку

здійснено кінцевими фрезами для чорнового (табл. 3.12) та напівчистового (табл. 3.13) фрезерування фірми «Sandvik» \varnothing 6–12 мм на вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL (п. 3.2.5). Альтернативні маршрути оброблення, режими різання приведено у п. 3.2.5.

Під час експериментальних досліджень визначали основні характеристики шорсткості поверхні згідно ISO 4287: Ra – середнє арифметичне відхилення профіля шорсткості від середньої лінії в межах базової довжини, мкм; Rz – висота нерівностей профіля шорсткості по десяти точках в межах базової довжини, мкм; R_{max} – найбільша висота профіля шорсткості (відстань між лінією виступів і лінією заглибин) в межах базової довжини, мкм; R_p – висота згладжування (відстань від лінії виступів до середньої лінії), мкм; R_q – середнє квадратичне відхилення профілю; S_m – середній крок нерівностей профілю; S – середній крок нерівностей по вершинах; tp – відносна опорна довжина профіля шорсткості на рівні p перерізу профіля.

Для визначення параметрів шорсткості використали контрольно-вимірювальний комплекс, розроблений у ФМІ НАН України ім. Г.В. Карпенка (м. Львів). Вимірювальний комплекс складається з профілограф-профілометра мод. «Калібр С-265», пристрою узгодження, аналогово-цифрового перетворювача, персонального комп'ютера та прикладного програмного забезпечення – комп'ютерної програми *Roughness Plot Analyzer* [192].

Результати експериментальних досліджень приведено у табл. 4.1, а статистичного опрацювання експериментальних досліджень зміни висотних характеристик профілю, що визначають параметри зносостійкості – на рис. 4.2.

Збільшення кута врізання з 5° до 8° , головного переднього кута: радіального з 9° до $10,5^\circ$, осьового з $5,5^\circ$ до $13,5^\circ$, кута підйому рівця з 35° до 45° кінцевих фрез для напівчистового оброблення (рис. 4.2) порівняно із чорновими фрезами, що традиційно застосовують для попередньої обробки на першому переході оброблення вилівка, забезпечує формування висотних параметрів мікропрофілю (Ra , Rq), характерного для напівчистої/чистої обробки. Із збільшенням швидкості різання із $V_{piz.}=58,43$ м/хв до $V_{piz.}=218,65$

м/хв для чорнового фрезерування відбувається погіршення якості поверхневого шару вилівка за параметрами Ra , Rq . Висота згладжування Rp різко зменшується для $V_{різ.}=58,43-100,53$ м/хв, потім зростає для $V_{різ.}=100,53-218,66$ м/хв. Значення крокових характеристик мікропрофілю $S=0,136-0,183$ мкм, $Sm=0,196-0,253$ мкм свідчать про відсутність «оливних кишень» на сформованому мікрорельєфі.

Таблиця 4.1

Зміна параметрів мікрорельєфу поверхні вилівка після фрезерування

| Параметр мікро-рельєфу | Ø 6 мм | | Ø 8 мм | | Ø 10 мм | | Ø 12 мм | |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 серія | 2 серія | 1 серія | 2 серія | 1 серія | 2 серія | 1 серія | 2 серія |
| Ra , мкм | 0,971 | 3,125 | 1,212 | 3,087 | 1,395 | 2,148 | 1,509 | 2,012 |
| Rz , мкм | 5,746 | 12,68 | 5,392 | 11,312 | 6,521 | 7,648 | 6,345 | 9,200 |
| $Rmax$, мкм | 8,582 | 15,046 | 6,925 | 14,500 | 8,458 | 9,701 | 8,523 | 15,628 |
| Rp , мкм | 6,683 | 6,412 | 2,634 | 8,179 | 2,927 | 3,908 | 5,534 | 5,504 |
| Rq , мкм | 1,533 | 3,693 | 1,507 | 3,572 | 1,789 | 2,475 | 1,848 | 2,57 |
| Sm , мкм | 0,253 | 19,987 | 0,226 | 24,685 | 0,196 | 15,558 | 0,243 | 23,442 |
| S , мкм | 0,183 | 15,556 | 0,156 | 19,581 | 0,136 | 12,84 | 0,159 | 14,988 |
| tm | 0,402 | 0,617 | 0,575 | 0,558 | 0,601 | 0,551 | 0,518 | 0,569 |

Зменшення кута врізання з 8° до 5° , головного переднього кута: радіального з $10,5^\circ$ до 9° , осьового з $13,5^\circ$ до $5,5^\circ$, кута підйому рівця з 45° до 35° кінцевих фрез для чорнового оброблення (рис. 4.2) порівняно із фрезами для напівчистої обробки на другому переході оброблення вилівка супроводжується погіршенням якості поверхні за висотними характеристиками (Ra , Rp , Rq). Поряд з тим із збільшенням швидкості різання від $V_{різ.}=58,43$ м/хв до $V_{різ.}=218,66$ м/хв відбувається покращання якості поверхневого шару вилівка за параметрами Ra , Rq . Висота згладжування Rp збільшується для $V_{різ.}=58,43-100,53$ м/хв, потім різко спадає для $V_{різ.}=100,53-182,21$ м/хв, знову

зростає для $V_{\text{різ.}} = 182,21\text{--}218,66$ м/хв. Крокові характеристики мікропрофілю (S , Sm) порівняно із першим переходом змінюються кардинально: від $S=0,136\text{--}0,183$ мкм, $Sm=0,196\text{--}0,253$ мкм при чорновому обробленні до $S=14,988\text{--}19,581$ мкм, $Sm=15,558\text{--}24,685$ мкм при напівчистовій обробці, що, поряд із погіршенням параметрів Ra і Rz , свідчить про формування «оливних кишень» на сформовану мікрорельєфі.

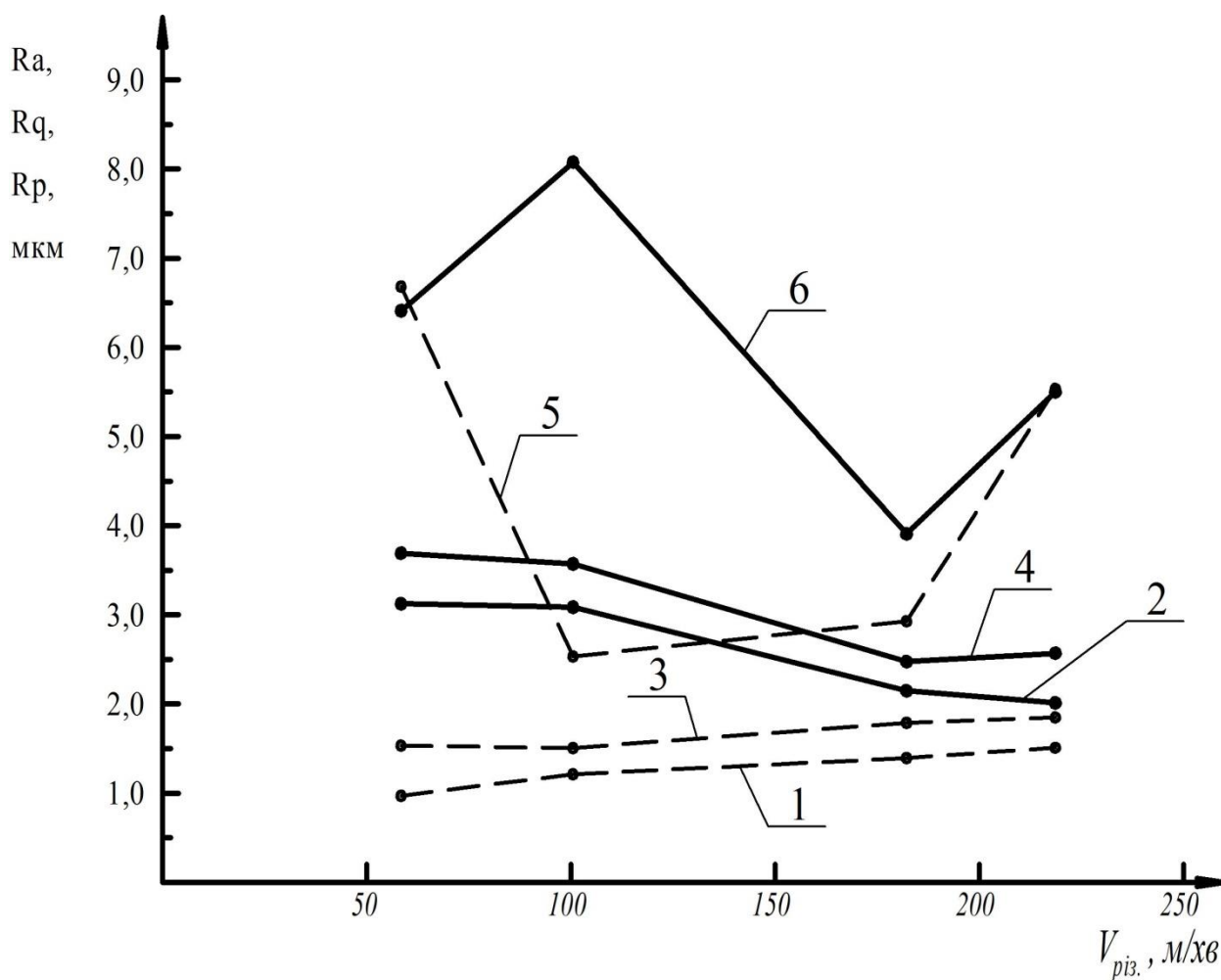


Рис. 4.2. Зміна висотних параметрів (Ra , Rq , Rp) мікропрофілю поверхні виливка із алюмінієвого сплаву після фрезерування кінцевими фрезами фірми «Sandvik»: 1, 2 – зміна параметра Ra відповідно для першої та другої обробок; 3, 4 – зміна параметра Rq відповідно для першої та другої обробок; 5, 6 – зміна параметра Rp відповідно для першої та другої обробок

Застосування нетипового для даного виду оброблення виду металорізального інструменту у технологічних маршрутах оброблення виливків

із алюмінієвого сплаву приводить до покращання висотних параметрів мікрорельєфу профіля при чорновому обробленню та їхньому погіршенню при подальшому обробленні і до істотного збільшення значень характеристик кроку (S, Sm) при переході від чорнового до напівчистового оброблення.

Для роботи в умовах зношування найраціональніше поєднання Ra, Sm, tm забезпечується для кінцевої фрези $\varnothing 12$ мм. Для циклічних знакозмінних навантажень при втомі найбільше значення $S=19,581$ мкм отримують для кінцевої фрези $\varnothing 8$ мм, а регламентовану міцність зчеплення з покриттям забезпечить кінцева фреза $\varnothing 10$ мм.

Розрахунок параметрів ν, b у залежності (4.13) при фрезеруванні поверхні заготовки з алюмінієвого сплаву кінцевими фрезами для чорнового та напівчистового оброблення здійснено за отриманими параметрами мікрорельєфу (табл. 4.1).

Зокрема, для 1 серії оброблення кінцевими фрезами $\varnothing 6$ мм:

$$\begin{aligned}
 & \text{- при } p \leq R_p; 0 \leq \varepsilon_{\max} \leq 0,5 & \text{- при } p > R_p; 0,5 < \varepsilon_{\max} \leq 1,0 \\
 \nu &= 2 \cdot 0,402 \cdot \left(\frac{6,683}{0,971} \right) - 1 = 4,534; & \eta_s &= 1 - (1 - 0,402) \left(\frac{8,582 - p}{8,582 - 6,683} \right)^{\frac{2 \cdot (1 - 0,402) \cdot (8,582 - 6,683)}{0,971} - 1} = \\
 b &= 0,402 \cdot \left(\frac{8,582}{6,683} \right)^{4,534} = 1,249; & &= 1 - (1 - 0,402) \left(\frac{8,582 - p}{1,899} \right)^{1,339} \\
 \eta_s &= 1,249 \cdot \varepsilon_{\max}^{4,534} = 0,402 \varepsilon_{\max}^{4,534}
 \end{aligned}$$

Результати цього та розрахунків для інших діаметрів кінцевих фрез і серій дослідів зведено у табл. 4.2.

Значення параметрів ν, b, tm , отримані за результатами експериментальних досліджень для різних методів механічного оброблення, приведено у табл. 4.3 [154].

Розраховані значення показників ν, b, tm при фрезеруванні кінцевими фрезами $\varnothing 6-12$ мм фірми «Sandvik» заготовки з алюмінієвого сплаву приведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.2

Розрахунок показників кривої Аббота

| Діаметр фрези, мм | Серія дос- лідів | Ділянка кривої Аббота | |
|-------------------------|------------------------|---|---|
| | | початкова частина | кінцева частина |
| | | $p \leq R_p; 0 \leq \varepsilon_{\max} \leq 0,5$ | $p > R_p; 0,5 < \varepsilon_{\max} \leq 1,0$ |
| Ø 6 | 1 серія | $v=4,534; b=1,249$ $\eta_s = 1,249 \cdot \varepsilon_{\max}^{4,534} = 0,402 \cdot \varepsilon^{4,534}$ | $\eta_s = 1 - 0,598 \cdot \left(\frac{8,582 - p}{1,899} \right)^{1,339}$ |
| | 2 серія | $v=1,532; b=2,279$ $\eta_s = 2,279 \cdot \varepsilon_{\max}^{1,532} = 0,617 \cdot \varepsilon^{1,532}$ | $\eta_s = 1 - 0,383 \cdot \left(\frac{15,046 - p}{8,634} \right)^{1,116}$ |
| Ø 8 | 1 серія | $v=1,499; b=2,449$ $\eta_s = 2,449 \cdot \varepsilon_{\max}^{1,499} = 0,575 \cdot \varepsilon^{1,499}$ | $\eta_s = 1 - 0,425 \cdot \left(\frac{6,925 - p}{4,291} \right)^{4,113}$ |
| | 2 серія | $v=1,957; b=1,711$ $\eta_s = 1,711 \cdot \varepsilon_{\max}^{1,957} = 0,558 \cdot \varepsilon^{1,957}$ | $\eta_s = 1 - 0,442 \cdot \left(\frac{14,5 - p}{6,321} \right)^{0,81}$ |
| Ø 10 | 1 серія | $v=1,522; b=1,552$ $\eta_s = 1,552 \cdot \varepsilon_{\max}^{1,522} = 0,601 \cdot \varepsilon^{1,522}$ | $\eta_s = 1 - 0,399 \cdot \left(\frac{8,458 - p}{5,531} \right)$ |
| | 2 серія | $v=1,005; b=1,374$ $\eta_s = 1,374 \cdot \varepsilon_{\max}^{1,005} = 0,551 \cdot \varepsilon^{1,005}$ | $\eta_s = 1 - 0,449 \cdot \left(\frac{9,701 - p}{5,793} \right)^{1,422}$ |
| Ø 12 | 1 серія | $v=2,799; b=1,735$ $\eta_s = 1,735 \cdot \varepsilon_{\max}^{2,799} = 0,518 \cdot \varepsilon^{2,799}$ | $\eta_s = 1 - 0,482 \cdot \left(\frac{8,523 - p}{2,989} \right)^{0,909}$ |
| | 2 серія | $v=2,113; b=5,162$ $\eta_s = 2,113 \cdot \varepsilon_{\max}^{5,162} = 0,569 \cdot \varepsilon^{5,162}$ | $\eta_s = 1 - 0,431 \cdot \left(\frac{15,628 - p}{10,124} \right)^{3,337}$ |

Таблиця 4.3

Параметри кривої Аббота для методів механічної обробки

| Вид оброблення | Параметри, що характеризують криву Аббота для вибраних методів технологічних обробок | | |
|----------------------------------|--|-------|----------|
| | ν | b | tm |
| Точіння, стругання, фрезерування | 1,2-2 | 1-2 | 0,43-0,5 |
| Шліфування | 1,6-3 | 1,5-4 | 0,4-0,6 |
| Полірування, доводка | 2-3 | 3-6 | 0,6-0,7 |

Таблиця 4.4

Аналіз відповідності параметрів кривої Аббота, характерних для методів механічного оброблення, при фрезеруванні кінцевими фрезами $\varnothing 6-12$ мм

| Діаметр фрези, мм | Серія дослідів | Параметри кривої Аббота | | |
|-------------------|----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| | | ν | b | tm |
| $\varnothing 6$ | 1 серія | 4,534 (-) | 1,249 (фрез.) | 0,402 (шліф.) |
| | 2 серія | 1,532 (фрез.) | 2,279 (шліф.) | 0,617 (доводка) |
| $\varnothing 8$ | 1 серія | 1,499 (фрез.) | 2,449 (шліф.) | 0,575 (шліф.) |
| | 2 серія | 1,957 (шліф.) | 1,711 (шліф.) | 0,558 (шліф.) |
| $\varnothing 10$ | 1 серія | 1,522 (фрез.) | 1,552 (фрез.) | 0,601 (доводка) |
| | 2 серія | 1,005 | 1,374 (фрез.) | 0,551 (шліф.) |
| $\varnothing 12$ | 1 серія | 2,799 (доводка) | 1,735 (шліф.) | 0,518 (шліф.) |
| | 2 серія | 2,113 (доводка) | 5,162 (доводка) | 0,569 (шліф.) |

Зміну відносної опорної довжини профіля по середній лінії tm для двох видів обробок приведено на рис. 4.3. Відносна опорна довжина профіля по середній лінії tm збільшується від 0,402 до 0,601 після чорнового фрезерування кінцевими фрезами для напівчистового оброблення для $V_{різ.}=58,43-182,21$ м/хв, потім спадає від 0,601 до 0,518 для $V_{різ.}=182,21-218,66$ м/хв. Після напівчистового фрезерування відносна опорна довжина профіля по середній лінії tm зменшується від 0,617 до 0,558 для $V_{різ.}=58,43-100,53$ м/хв. Для $V_{різ.}=100,53-182,21$ м/хв величина tm практично не змінюється: $tm=0,558-0,551$. Для $V_{різ.}=182,21-218,66$ м/хв відзначається незначне зростання $tm=0,551-0,569$.

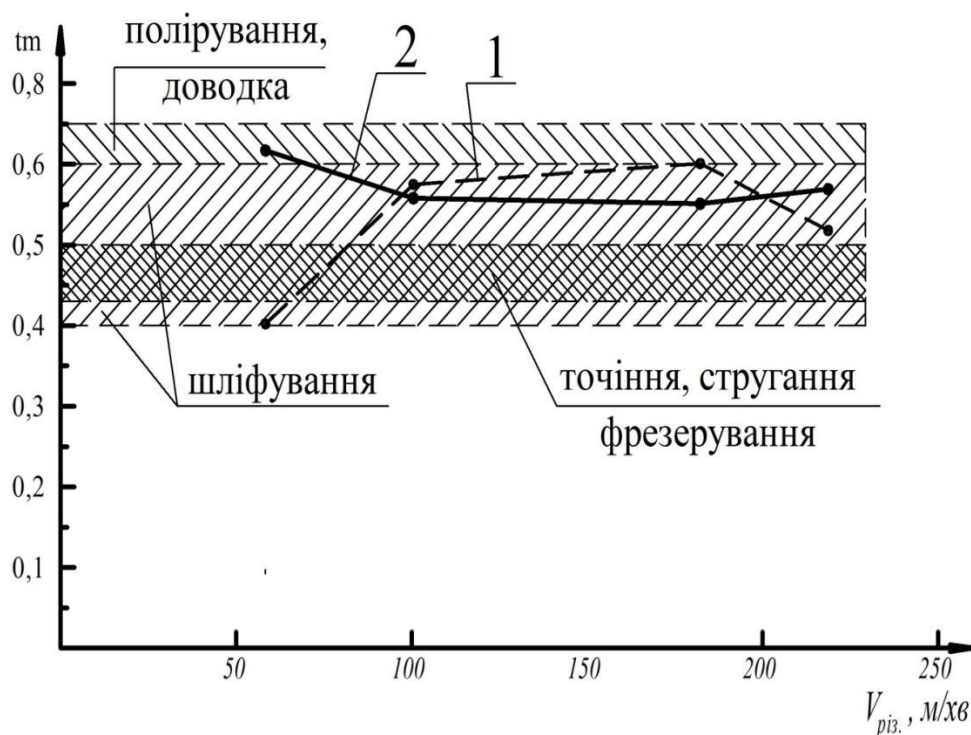


Рис. 4.3 Зміна відносної опорної довжини профіля по середній лінії tm від швидкості різання $V_{різ.}$ при фрезеруванні: 1 – після чорнового оброблення; 2 – після напівчистового оброблення кінцевими фрезами фірми «Sandvik»

Результати експериментальних досліджень процесу формування поверхневого шару вилівка із алюмінієвого сплаву після фрезеруванням кінцевими фрезами дозволяють зробити такі висновки. У багатьох випадках одночасний сумарний вплив значної кількості технологічних факторів системи

ВПД(З) на поверхневий шар оброблених заготовок, зумовлює появу випадкових похибок, що підпорядковуються різним законам розподілу, так і систематичних або змінних систематичних похибок. Це призводить до формування закону розподілу матеріалу у поверхневому «шорсткому» шарі у вигляді композиції декількох законів розподілу. Для проведених експериментів (табл. 4.2, 4.4) формування поверхневого шару відповідає умовам, характерним для різних методів механічної обробки, при аналізі за допомогою показників кривої Аббота (табл. 4.3). Отримані результати експериментальних досліджень є неоднозначні, що можна пояснити невідповідністю металорізального інструмента даному методу механічного оброблення.

При реалізації технологічного маршруту оброблення алюмінієвої заготовки: чорнове фрезерування напівчистовими фрезами, напівчистове фрезерування чорновими фрезами і аналізі за зміною показників v , b на першому технологічному переході формується мікрорельєф поверхні, що описується параметрами кривої Аббота, характерних як для попередньої (фрезерування), так і для фінішної обробки (шліфування) (табл. 4.4, рис. 4.2). На другому технологічному переході в основному (за винятком $\varnothing 10$ мм) формується мікрорельєф поверхні, характерний для фінішної та викінчувальної обробок (рис. 4.2).

При аналізі зміни показників кривої Аббота для двох почергових переходів механічної обробки при реалізації технологічного маршруту оброблення поверхонь виробу за критерієм tm (табл. 4.4, рис. 4.2) формування параметрів мікрорельєфу відповідає фінішній (шліфування) та викінчувальній (полірування, доводка) обробкам.

Тому застосування сучасних металорізальних інструментів, верстатів, технологічного оснащення та технологічних систем і комплексів вимагає формування бази даних маршрутів оброблення поверхонь виробів для ефективного використання прогресивних елементів системи ВПД(З) під час оброблення машинобудівних виробів.

4.2. Розроблення технологічного процесу виготовлення втулки циліндрової бурової помпи НБ-32 з використанням принципів ФОП

Недоліком, розглянутої у п. 4.1 методики є неврахування умов роботи поверхонь у спряженні, що важко реалізувати без підтвердження результатами натурних випробувань. Це особливо важливо для деталей машин, що працюють в умовах силового навантаження та інтенсивного зношування, зокрема, важконавантажені вироби бурового обладнання.

4.2.1. Аналіз вхідних даних для розроблення ТП виготовлення втулки циліндрової бурової помпи

Техніко-економічні показники бурових робіт у нафто- чи газовидобувній промисловості залежать від експлуатаційних характеристик і ресурсу бурових інструментів. Проте показники надійності інструменту шарошкового типу суттєво залежать від своєчасного нагнітання промивної рідини (води, глинистого розчину) в свердловину під час визначеного (геологорозвідувального або структурно-пошукового) буріння корисних копалин буровими помпами, зокрема моделей НБ-32, НБ-50 тощо [162, 239]. До найнавантаженіших частин помпи, зокрема НБ-32, відносять деталі гідравлічної частини: поршні, циліндрові втулки, штоки поршнів і повзунів, клапани і сідла клапанів. Забезпечення надійності та підвищення ресурсу відповідальних деталей pomp, зокрема циліндрових втулок, технологічними методами підвищує конкурентоздатність та ефективність бурового обладнання.

Сучасна технологія виготовлення будь-яких деталей ставить високі вимоги як до продуктивності використовуваного обладнання, так і до точності та якості оброблюваних поверхонь [245, 247]. У той же час, досвід експлуатації машин, приладів, апаратів переконливо свідчить, що надійність та довговічність залежать від характеру контактування спряжених деталей одна з одною або з рідким, газовим та іншим середовищем, який визначає стан поверхневого шару контактних деталей [239]. Крім того, багаточисельними дослідженнями встановлено, що якість поверхні деталей машин характеризує

зносостійкість, міцність, корозійну стійкість та інші експлуатаційні властивості деталей машин.

Формування параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності відбувається на фінішних і викінчувально-зміцнювальних операціях технологічних процесів виготовлення виробів. Методи механічного оброблення, що реалізують фінішні технологічні операції, дозволяють керувати якістю поверхневого шару лише у вузьких межах; при цьому резерви міцності матеріалів залишаються невикористаними [239]. Для реалізації викінчувально-зміцнювальних операцій технологічних процесів застосовують хіміко-термічні методи оброблення та нанесення покриттів і методи оброблення тиском (ППД). При використанні хіміко-термічних методів оброблення та нанесення покриттів необхідне залучення працівників високої кваліфікації для обслуговування специфічного устаткування. Поряд з тим, широке промислове використання хіміко-термічних методів гальмується надзвичайно високою енергомісткістю процесу.

Ефективними технологічними методами реалізації викінчувально-зміцнювальних операцій технологічних процесів з метою забезпечення показників надійності виробів машинобудування є поверхневе зміцнення за допомогою різноманітних способів поверхневого пластичного деформування, зокрема з використанням вібрацій.

Значний внесок у дослідження коливних процесів і використання вібрацій для технологічних цілей, зокрема, викінчувально-зміцнювальних операцій, зроблено науковцями Національного університету «Львівська політехніка» [172]. Зокрема, під керівництвом проф. Афтаназіва І.С. розроблено метод вібраційно-відцентрового оброблення (ВВО) для технологічного забезпечення показників якості поверхні деталей машин і механізмів. Головною відмінністю методу ВВО від інших методів ППД, в яких зусилля деформування обмежене масою одиничного деформівного елемента – кульки чи ролика, є те, що в кожен проміжок часу контактування оброблюваної деталі із виконавчим органом пристрою відбувається через незначну кількість кульок, розташованих вздовж

твірних оброблюваної поверхні деталі. Тілами, що співударяються, є масивні (порівняно з масою кульки чи ролика) деталь і виконавчий орган зміцнювального пристрою [195, 239]. Найпоширеніше у машинобудівній практиці технологічне устаткування й оснащення для вібраційно-відцентрових пристроїв з дебалансним і електромагнітним приводом має свої переваги й недоліки, що обмежує область їхнього використання. На жаль, не завжди ефективними були спроби адаптувати вібромашини об'ємного оброблення для вібраційно-відцентрового зміцнення виробів.

Тому проблема надійності виробів сучасного машинобудування, зокрема циліндрових втулок бурових pomp, яка проникає у сфери виробництва та експлуатації машин, вимагає системності у прийнятті технологічних рішень і розробленні нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів виготовлення виробів [38, 47, 99, 230, 239, 247, 250].

Дослідження формування параметрів якості машинобудівних виробів під час реалізації принципу ФОП технологічних маршрутів обробки виконавчих і спряжених поверхонь виробу у ТП його виготовлення проведено для втулок циліндрових бурових pomp НБ-32, що виготовлено на ПП «Техноресурс» (м. Калуш Івано-Франківська обл.).

Помпа НБ-32 – це двоциліндрова поршнева помпа із зубчастим редуктором, що складається з блоку приводу і змонтованого на рамі гідравлічного блоку. Вона призначена для нагнітання промивної рідини (води, глинистого розчину) в свердловину під час геологорозвідувального і структурно-пошукового буріння на нафту та газ, а також для перекачування різних неагресивних рідин на підприємствах харчової, хімічної та будівельної промисловості [110, 315].

Циліндро-поршнева група, що складається із поршня з манжетами та циліндрової втулки, забезпечує тиск для перепомповування рідини. Деталі спряження працюють у середовищі слабо-агресивної та високо-абразивної рідини [110, 315].

Втулка циліндрова (рис. 4.4) служить відповідальною деталлю циліндро-поршневої групи бурової помпи НБ-32 [245, 247].

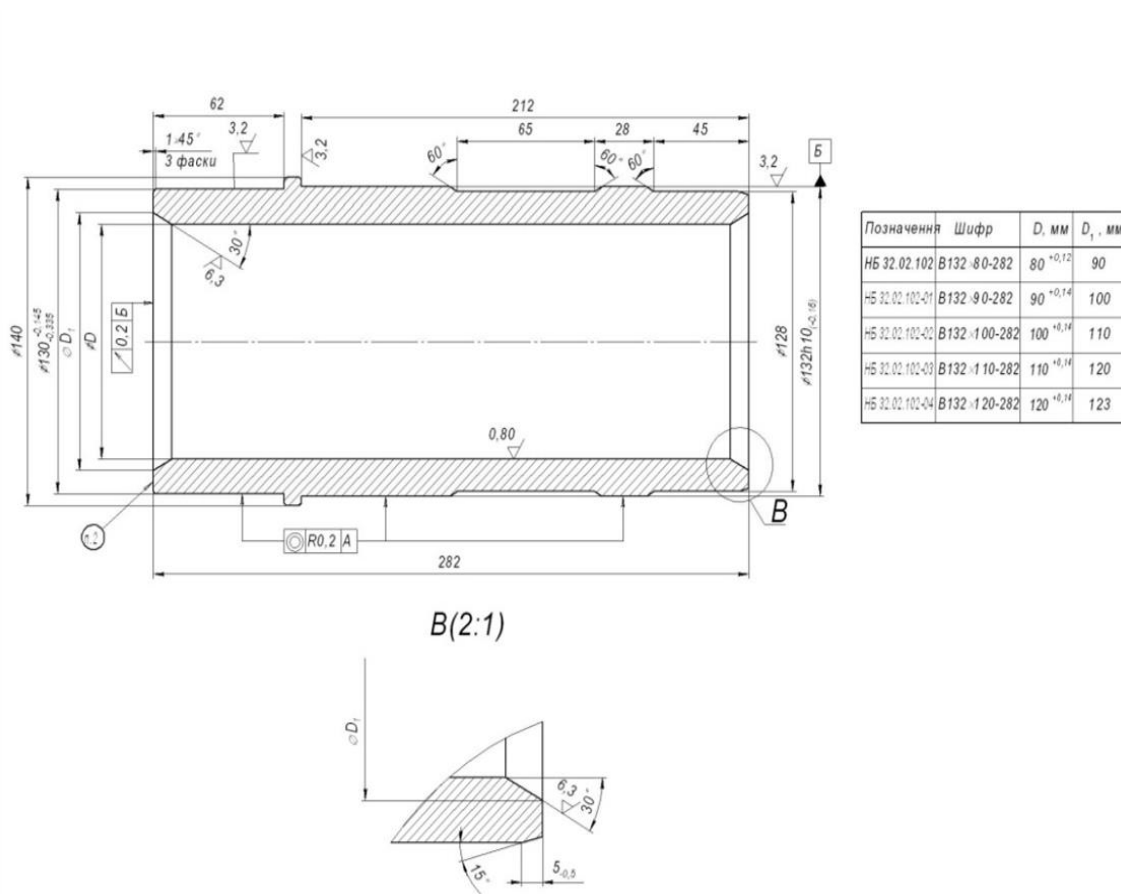


Рис. 4.4. Ескіз втулки циліндрової бурової помпи НБ-32

Ескіз втулки циліндрової НБ 32.02.102-02 із позначенням поверхонь, що підлягають механічному обробленню приведено на рис. 4.5.

Деталь «Втулка циліндрова НБ 32.02.102-02» забезпечує подачу рідини при зворотно-поступальному переміщенні поршня з манжетами. Зовнішньою циліндричною поверхнею 11 (базою Б), торцями 1 і 10 втулка встановлюється у блоці циліндрів. Внутрішня циліндрична поверхня 3 в розмір $\varnothing 100^{+0,12}$ мм служить для спряження із поршнем з манжетою. Фаски 2 і 4 служать орієнтувальними елементами (рис. 4.5) [186, 187].

Решта поверхонь відносять до вільних.

Оскільки поверхня 3 в розмір $\varnothing 100H10^{+0,14}$ – виконавча (функціональна), то при відносно невисоких вимогах до точності (10 квалітет точності, зазор вибирається манжетою на поршні) поставлено високі вимоги щодо якості

поверхонь $Ra = 0,8$ мкм. Поверхню 7 в розмір $\varnothing 130_{-0,19}$ виконано за 10 квалітетом точності ($Td = 0,19$ мм) при $Ra = 3,2$ мкм. Поверхню 11 в розмір $\varnothing 132h10_{-0,16}$ оброблено по 10 квалітету точності ($Td = 0,16$ мм) при $Ra = 3,2$ мкм, торець 10 – IT14 і $Ra = 3,2$ мкм, західні фаски 2, 4 обробляють згідно 14 квалітету точності з шорсткістю $Ra = 6,3$ мкм. Вільні поверхні, що піддають механічному обробленню, обробляють в межах 14 квалітету точності (однократна обробка) із параметром шорсткості поверхонь $Ra = 12,5$ мкм [186, 187].

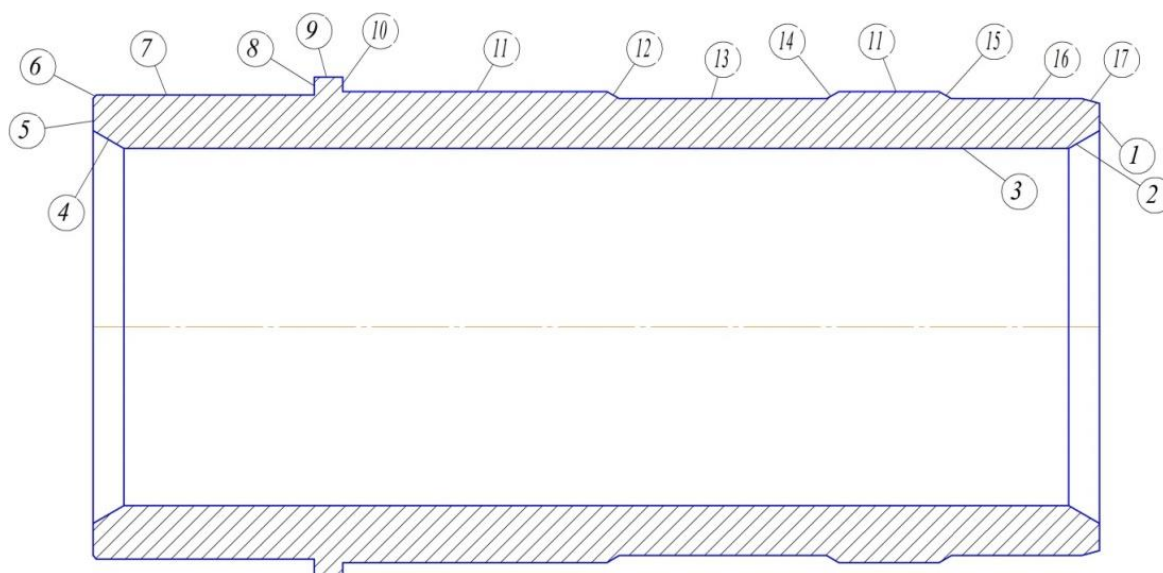


Рис. 4.5. Втулка циліндрова бурової помпи з позначенням поверхонь, що підлягають механічному обробленню

Втулки циліндрові виготовляються із сталей 70 ГОСТ 1050-80 і 40Х ГОСТ 4543-80 [194].

Аналізу підлягає заводський технологічний маршрут оброблення втулки циліндрової, яка виготовлена на ПП «Техноресурс» (м. Калуш)

Заводський технологічний маршрут механічного оброблення втулки
циліндрової бурової помпи

005 Токарно-гвинторізна

Установ А. Встановити заготовку у патрон, вивірити та закріпити.

1. Підрізати торець 5 однократно.

2. Точити поверхню 3 начорно напрохід.
3. Точити поверхню 3 начисто напрохід.
4. Точити фаску 4 начорно.
5. Точити фаску 4 начисто.

Установ Б. Розкріпити, перевстановити заготовку у патроні, вивірити та закріпити.

6. Підрізати торець 1 однократно.
7. Точити фаску 2 начорно.
8. Точити фаску 2 начисто.

Установ В. Розкріпити заготовку у патроні, зняти та покласти в тару.

010 Токарно-гвинторізна

Установ А. Встановити заготовку у центрах, вивірити та закріпити.

1. Точити поверхню 11 начорно напрохід.
2. Підрізати торець 10 однократно.
3. Точити поверхню 11 начисто напрохід.
4. Точити поверхню 16, фаску 15 однократно.
5. Точити фаску 13, поверхню 14 однократно.
6. Точити фаску 12 однократно.
7. Точити фаску 17 однократно.

Установ Б. Розкріпити, перевстановити заготовку у центрах, вивірити та закріпити.

8. Точити поверхню 7 начорно напрохід.
9. Точити поверхню 9 однократно напрохід.
10. Підрізати торець 8 однократно.
11. Точити поверхню 7 начисто напрохід.
12. Точити фаску 6 однократно.

Установ В. Розкріпити заготовку у центрах, зняти та покласти в тару.

015 * Термооброблення

Гартувати втулку.

020 Внутрішньо-шліфувальна

Установ А. Встановити заготовку у пристрої, вивірити та закріпити.

1. Шліфувати поверхню 3 попередньо напрохід.
2. Шліфувати поверхню 3 кінцево напрохід.

Установ Б. Розкріпити заготовку у пристрої, зняти та покласти в тару.

025 Вертикально-хонінгувальна

Установ А. Встановити заготовку у пристрої, вивірити та закріпити.

1. Хонінгувати поверхню 3 напрохід.

Установ Б. Розкріпити заготовку у пристрої, зняти та покласти в тару.

* Операція 015 залежно від експлуатаційних вимог може бути вилучена із ТП виготовлення втулки.

На виробничому підприємстві ПП «Техноресурс» (м. Калуш) деталь «Втулка циліндрова НБ 32.02.102-02» виготовляється в умовах дрібносерійного виробництва із використанням універсальних верстатів загального призначення, універсальних і стандартних інструментів, застосуванням верстатних пристроїв до металорізальних верстатів із ручним (гвинтовим, ексцентриковим) приводом із залученням робітників високої кваліфікації. ТП складається із двох токарних операцій, термооброблення (за потреби) та двох фінішних: внутрішньо-шліфувальної та вертикально-хонінгувальної. На фінішних операціях забезпечуються регламентовані параметри якості виконавчої поверхні 3 в розмір $\varnothing 100H14^{+0,14}$ мм.

4.2.2. Визначення лімітуючих функціональних поверхонь, аналіз характерних видів пошкоджень і обґрунтування вибору типу викінчувальної операції

Застосування функціонально-орієнтованих технологій (ФОТ) ускладнює процес виготовлення виробів, проте, забезпечуючи необхідні експлуатаційні характеристики для функціональних поверхонь деталей машин, визначає якісно нову сукупність властивостей і міру корисності виробів машинобудування при

експлуатації. Це дозволяє відчутно підвищити техніко-економічні показники експлуатації та застосування машин при взаємодії їхніх підсистем [247, 248, 258].

У загальному випадку технічний рівень проєктованих ФОТ формує інженерну піраміду у вигляді ієрархічної структурованої множини, що містить 7 ієрархічних підмножин функціональних елементів [262, 358].

Згідно загальних принципів ФОП технологічні маршрути оброблення виконавчих і спряжених поверхонь виробу у ТП його виготовлення відповідно до службового призначення деталі машини реалізуються в процесі технологічного забезпечення визначених функціональних поверхонь (або визначеної функціональної поверхні) для оброблюваної деталі на рівнях робочих зон, макро-, мікро- і нанозон із дотриманням технічних вимог для рівнів складальної одиниці та машини загалом. Вибір рівня досліджень визначається на етапі КТПВ та підтверджується методами математичного моделювання та натурних випробувань.

Функціональною поверхнею для втулки циліндрової НБ 32.02.102-02 служить поверхня 3 в розмір $\varnothing 100H14^{+0,14}$ (IT10, $Ra = 0,8$ мкм).

Як зазначається в [315], 33% випадків відмов бурових pomp відбувається через зношування пари циліндрична втулка – манжета поршня.

Встановлено, що в процесі експлуатації бурової помпи найшвидше зношуються циліндрові втулки внаслідок абразивної дії піску, що міститься в буровому розчині, оскільки повне очищення рідини від твердих частинок гірської породи не забезпечується. У режимі низького тиску найвираженішими видами зношування циліндро-поршневих пар є абразивне і гідро-абразивне, в результаті яких робочі поверхні втулок і поршнів покриті густою мережею поздовжніх рисок різної глибини. У режимі середнього тиску, який найпоширеніший для бурових pomp, характерними є абразивне, гідроабразивне, втомне зношування деталей пари. У режимі високого тиску (особливо вище 20 МПа) циліндро-поршнева пара виходить з ладу внаслідок передчасного руйнування поршня під дією високої температури тертя.

Параметри якості поверхневого шару виробів і розраховане значення інтенсивності зношування для методів лезового оброблення та ППД внутрішніх циліндричних поверхонь приведено в табл. 4.5 [127].

Таблиця 4.5

Інтенсивність зношування для методів лезового оброблення та ППД внутрішніх циліндричних поверхонь [127]

| Метод обробки | Відносні параметри стану поверхневого шару | | | | | | | Показник I |
|---------------|--|---------|----------|-----------|----------|---------|----------|--------------|
| | Ra | Wz | $Hmax$ | λ | t_{0y} | Sm | H_{0y} | |
| розкочування | 0,4-1,0 | 1,3-1,4 | 1,25-2,0 | 1,1 | 1,3 | 0,6-3,2 | 1,75-3,0 | 0,20-0,50 |
| вигладжування | 0,06-1,0 | 1,3-1,2 | 0,2-0,7 | 1,1 | 1,3 | 0,4-3,2 | 1,75-2,0 | 0,10-0,36 |
| шліфування | 0,4-0,8 | 0,5-1,0 | 0,4-0,5 | 0,9 | 1,1 | 0,4-0,5 | 0,75-1,0 | 1,07-1,25 |
| розточування | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

Згідно табл. 4.5 застосування методів ППД у 2-10 разів зменшує інтенсивність зношування деталей машин порівняно із лезовим обробленням і у 2,14-12,5 разів – порівняно із абразивною обробкою.

Тому заміна абразивного оброблення обробкою тиском, зокрема, вібраційно-відцентровим обробленням (ВВО_а) на викінчувальній операції ТП виготовлення втулок циліндрових зменшує інтенсивність їхнього зношування та збільшує ресурс роботи.

При цьому точність оброблення для $\varnothing 100H14^{+0,14}$ забезпечується на попередньому переході – чистовому точінні.

Проектування технологічного маршруту обробки поверхні в розмір $\varnothing 100H14^{+0,14}$ мм здійснено із застосуванням принципу ФОП при розробленні технологічного процесу виготовлення втулки циліндрової бурової помпи НБ-32.

Технологічний процес виготовлення втулки
циліндрової бурової помпи НБ-32

005 Токарно-гвинторізна

1. Підрізати торець 5 однократно.
2. Розточити поверхню 3 начорно напрохід.
3. Розточити поверхню 3 начисто напрохід.
4. Точити фаску 4 начорно.
5. Точити фаску 4 начисто.
6. Підрізати торець 1 однократно.
7. Точити фаску 2 начорно.
8. Точити фаску 2 начисто.

010 Токарно-гвинторізна

1. Точити поверхню 11 начорно напрохід.
2. Підрізати торець 10 однократно.
3. Точити поверхню 11 начисто напрохід.
4. Точити поверхню 16, фаску 15 однократно.
5. Точити фаску 13, поверхню 14 однократно.
6. Точити фаску 12 однократно.
7. Точити фаску 17 однократно.
8. Точити поверхню 7 начорно напрохід.
9. Точити поверхню 9 однократно напрохід.
10. Підрізати торець 8 однократно.
11. Точити поверхню 7 начисто напрохід.
12. Точити фаску 6 однократно.

015 * Термооброблення

Гартувати втулку.

020 Вібраційно-відцентрова

1. Обробити ВВО (ВВО_а) поверхню 3 попередньо.
2. Обробити ВВО (ВВО_а) поверхню 3 кінцево.
3. Модифікувати поверхню 3 твердосплавним покриттям.

* Операція 015 залежно від експлуатаційних вимог може бути вилучена із ТП виготовлення втулки.

4.3. Технологічне забезпечення геометричних параметрів якості виконавчих (функціональних) циліндричних поверхонь деталей машин на викінчувально-зміцнювальних технологічних операціях пристроями з дебалансними приводами

4.3.1. Розроблення технологічного оснащення для реалізації вібраційно-відцентрового оброблення при використанні вібромашин з дебалансним приводом

Модифікування внутрішніх поверхонь деталей форми тіл обертання за традиційною схемою вібраційно-відцентрового оброблення [73, 195] не забезпечує високої енергії деформування та є складно реалізованим. Аналіз літературних джерел свідчить, що немає універсального методу забезпечення надійності та підвищення довговічності циліндричних виробів. Однак на сучасному етапі розвитку машинобудування в умовах економічної кризи доцільно не проєктувати нове ефективне, однак вартісне технологічне спорядження, а адаптувати перевірені часом, хоча і морально застарілі, конструкції пристроїв [26, 30, 36].

Зокрема, у Національному університеті «Львівська політехніка» здійснено вдалі спроби адаптації обладнання об'ємного вібраційного оброблення (вібромашини об'ємного оброблення) для реалізації методу ВВО деталей машин форми тіл обертання, розробленого у Національному університеті «Львівська політехніка». Методом ВВО_а обробляють внутрішні поверхні деталей форми тіл обертання, зокрема циліндричних втулок бурової помпи НБ-32. Принципова схема установки для реалізації методу ВВО приведена на рис. 4.8, експериментальний зразок оснащення – на рис. 4.9 [306].

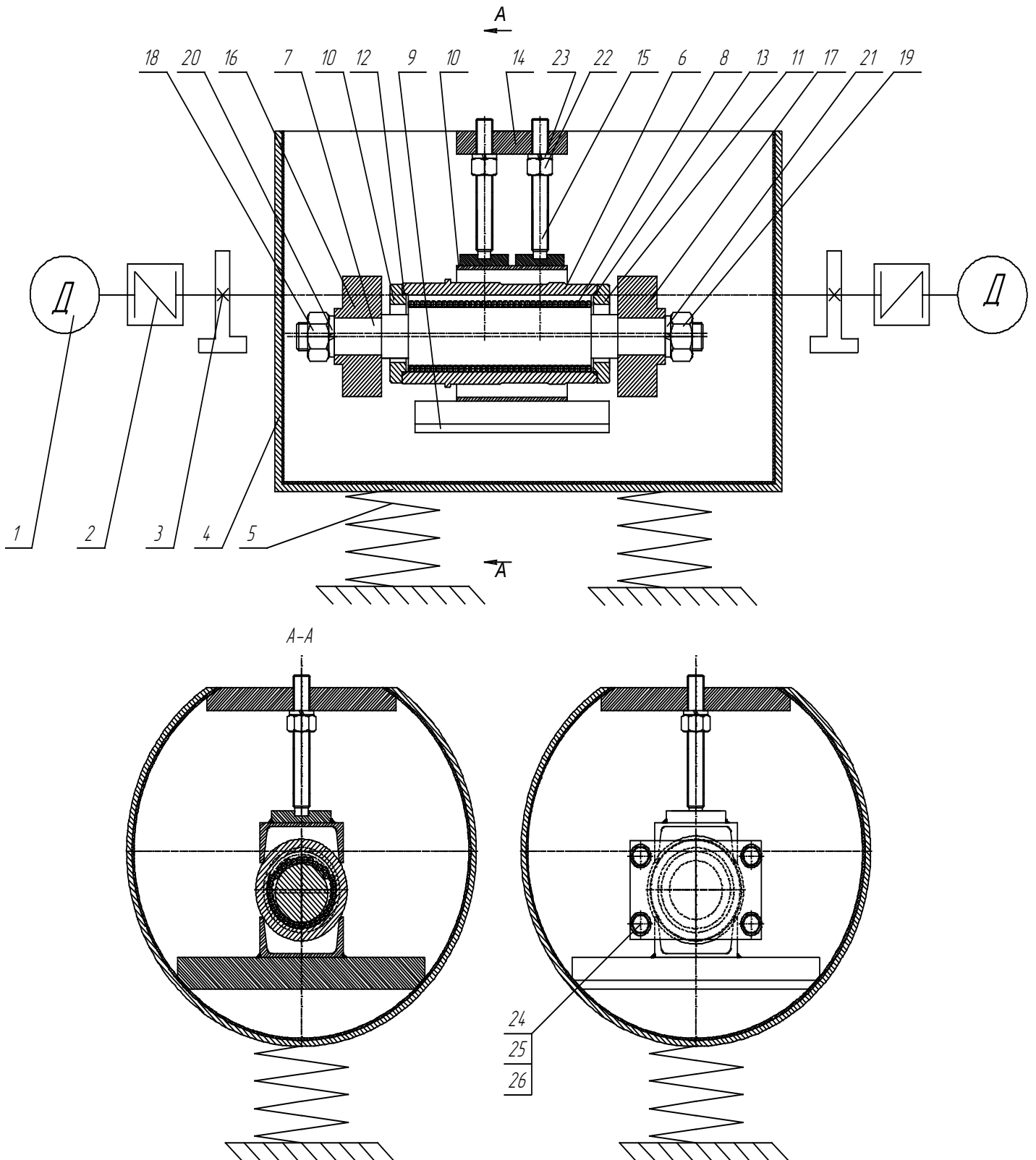


Рис. 4.8. Принципова схема установки для реалізації вібраційно-відцентрового оброблення на вібромашині об'ємної обробки



а)



б)

Рис. 4.9. Технологічне оснащення для ВВО_а внутрішніх поверхонь циліндричних виробів на вібротурині об'ємного оброблення

Класичну конструкцію вібротурини об'ємного оброблення із дебалансним приводом використано для оброблення ВВО_а внутрішніх поверхонь циліндричних втулок бурової помпи НБ-32.

У порожнину оброблюваної втулки 6 (рис. 4.8) вільно встановлено обкатник 7, армований поліуретаном, і засипано деформівні тіла 8, об'єм яких встановлюють експериментальним шляхом або на підставі рекомендацій. З торців втулку закрито кришками 10, 11 із компенсаційними втулками 12, 13 і стягнуто гвинтами 24 із гайками 25 і шайбами 26. На посадні шийки обкатників встановлено втулки 16, 17, причому гайки 18, 19 із шайбами 20, 21 обмежують їх осьове переміщення. Масу обкатників розраховано за умови забезпечення необхідного зусилля оброблення поверхонь виробів. Після цього оброблювану втулку 6 із спорядженням, описаним вище, базують по зовнішній циліндричній поверхні на опорі 9 – швелері, привареному до плити, що встановлюється за допомогою фаски на внутрішній обгумованій поверхні віброконтейнера 4 (базування в призмі). Закріплення втулки 6 здійснюється за допомогою прихвата 10, реалізованого за допомогою швелера, привареного до плити, і планки 14,

що розпираються двома центрально розташованими підп'ятниками 14. Планка 14 встановлюється за допомогою фаски на внутрішній обгумованій поверхні віброконтейнера 4. Переміщення підп'ятників здійснюється за допомогою різі у планці 14. Гайки 22 запобігають пошкодженню різі під час вібрацій контейнера і слугують для надійного закріплення оснащення [306].

Викінчувально-зміцнювальне оброблення внутрішніх поверхонь циліндричних втулок бурової помпи НБ-32 здійснюють у такій послідовності (рис. 4.8). При подачі напруги на обмотки двигунів 1 через пелюсткові муфти 2 надають обертового руху дебалансам 3. Обертання дебалансів спричиняє збудження коливань віброконтейнера 4 із заданою амплітудою. За рахунок коливань віброконтейнера 4 вільно встановлений у втулці 6 обкатник 7 самовтягується у режим вібраційного підтримання обертання, який супроводжується обкочуванням по внутрішній оброблюваній поверхні циліндричної деталі 6. Обкочування обкатника 7 відбувається по вільно розміщених між ним і оброблюваною поверхнею деформівних тілах 8 (у даному випадку – сталєних загартованих кульках). У дискретний проміжок часу контактування внутрішньої поверхні втулки 6 із обкатником 7 відбувається через незначну кількість деформівних тіл 8, розташованих вздовж твірних оброблюваної поверхні деталі. Контактуювання деталі з черговою групою кульок відбувається з ударом, причому тілами, що співударяються, є масивні обкатник 7 і деталь 6. Наявність співударянь втулки 6 із обкатником 7 при контактуванні їх через незначну кількість деформівних тіл приводить до розвитку великих контактних напружень у матеріалі оброблюваної деталі в місцях контакту, в результаті чого оброблюваний матеріал пластично деформується, зміцнюється. Товщину зміцненого шару, ступінь та рівномірність зміцнення регулюють за допомогою зміни часу оброблення, типорозмірів деформівних тіл, маси обкатника [306].

4.3.2. Метрологічне забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні у системі «верстат – пристрій – інструмент – заготовка» на етапі виробництва стадії створення деталей машин у їхніх життєвих циклах

Технічний контроль технологічного процесу виготовлення виробів є важливою складовою системи керування якістю на підприємствах різних галузей машинобудування. На етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва розробляється технологічний процес технічного контролю виробу, технологічна операція технічного контролю у ТП виготовлення деталі або технічний контроль виконується на операції механічного оброблення [282, 290].

Витрати на контроль в деяких галузях перевищують 50 % від собівартості продукції. У металообробній промисловості вони складають 8-15 % витрат виробництва, причому 90-95 % цих витрат відносяться до контролю лінійних і кутових розмірів. Технічний контроль повинен раціонально охоплювати технологічний процес виготовлення виробів для виявлення із заданою ймовірністю дефектних заготовок, деталей під час механічного оброблення і складальних одиниць, машин при складанні [290, 303].

Поряд із діагностуванням точності виготовлення виробів контролю підлягають параметри якості поверхневого шару.

Методи контролю мікрогеометрії поверхні містять апаратний (приладовий) контроль за допомогою приладів та безапаратний (органолептичний) контроль без використання приладів (табл. 5.4) [198].

Метод порівняння досліджуваних деталей із зразками або з еталонними деталями (табл. 3.9) при контролі вимагає повну ідентичність їхнього матеріалу, структури і термічної обробки, повну відповідність технологічного методу обробки та режимів різання, використовуваного інструменту тощо. В зв'язку з цим використання метод візуального порівняння із зразками або еталонною деталлю застосовують обмежено [198].

Контроль технологічного процесу обробки поверхні (табл. 3.9) — метод, який широко застосовують у промислово розвинутих країнах світу. Суть цього

методу полягає в тому, що контролюють параметри технологічних маршрутів оброблення виконавчих і спряжених поверхонь при виготовленні виробів. На підставі отриманих методом планування експериментальних досліджень емпіричних залежностей прогнозують значення геометричних і фізико-механічних параметрів якості поверхні у діапазоні зміни технологічних параметрів оброблення виробів. Набагато більше можливостей для керування технологічними операціями оброблення методом поверхневого пластичного деформування (ППД), ніж обробкою різанням [198].

Таблиця 4.7

Методи контролю мікрогеометрії поверхонь [390]

| Апаратні | | Безапаратні |
|---|---------------------|--|
| Профільний метод контролю приладами послідовного перетворення профілю | Профілографування | Візуальний |
| | Профілометрування | |
| Профільний метод контролю приладами одночасного перетворення профілю | Інтерферометрування | Візуальний порівнянням із зразками або еталонною деталлю |
| | Світловий перетин | |
| | Тіньова проекція | |
| Інтегральний метод контролю по поверхні | Рефлектометрування | Контроль технологічного процесу обробки поверхні |
| | Електричний метод | |
| | Пневматичний метод | |
| | Тепловий метод | |
| | Акустичний метод | |

Серед методів апаратного контролю найпоширенішими є методи профілографування та профілометрування з використанням «голчастого» давача-перетворювача, контактний рух якого по шорсткій поверхні дає інформативний сигнал про її форму та величину шорсткості. Опрацювання цього інформативного сигналу з метою визначення кількісних часткових характеристик шорсткості поверхні здійснюють різноманітними методами з різною точністю та трудомісткістю [307-309].

Співставлення висотних характеристик макровідхилень (рис. 4.10, *a*) і шорсткості (рис. 4.11, *a*) свідчать, що корисний сигнал про шорсткість поверхні

у розглянутого типового мікропрофіля складає менше 25 % від загального сигналу із паразитними складовими. Це дозволяє зробити висновок про необхідність фільтрування сумарного сигналу від контрольованого мікропрофіля, яке не можна здійснити існуючими апаратними засобами профілометра-профілографа, а реалізується лише у розробленому контрольно-обчислювальному приладі комплексу контролю шорсткості, що працює за спеціально розробленим алгоритмом [196-198].

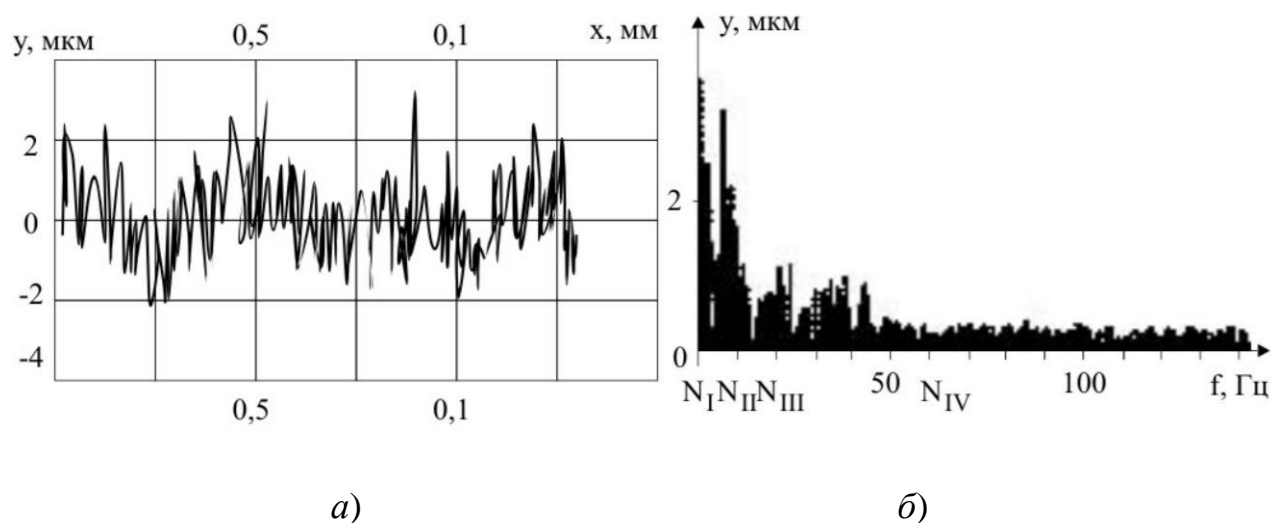


Рис. 4.10. Профілограма поверхні (а) і частотні діапазони амплітудного спектра (б) із паразитними складовими

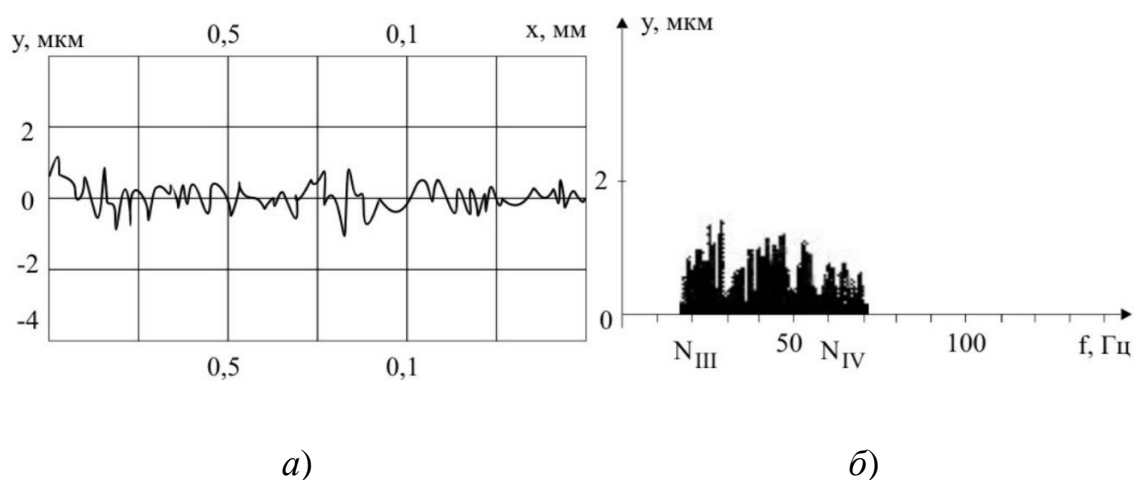


Рис. 4.11. Профілограма поверхні (а) та частотні діапазони амплітудного спектра (б) без паразитних складових

Похибки базування, локальні неоднорідності та кривизну поверхні, хвилястість поверхні, шуми та наведення самої вимірної системи усувають за допомогою фільтрів $\Phi 1-\Phi 4$, що реалізують у вигляді індуктивностей L_1-L_4 .

Відзначаючи беззаперечні переваги запропонованої принципової схеми комплексу контролю шорсткості порівняно із базовими приладами, слід зробити зауваження. Для усунення гармонік амплітудного спектру низькочастотного діапазону, як свідчить практика електронного виробництва, доцільніше як фільтри використовувати ємності (C) або поєднання ємності та індуктивності (C-L).

З курсу теорії коливань амплітуду гармоніки частотного спектру визначають за формулою [198]:

$$A_{f \text{ рез. } j} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_i \cdot C_i}} \quad (4.4)$$

При використанні комбінованого фільтра, задавшись одним параметром, підбирають інший. Для усунення гармонік амплітудного спектру високочастотного діапазону як фільтри застосовують індуктивність (C) або поєднання ємності та індуктивності (C-L).

Модернізовану принципову схему комплексу контролю шорсткості приведено на рис. 4.12 [198].

Вимірювання параметрів шорсткості проведено за допомогою вимірного комплексу, принципову схему якого зображено на рис. 4.13, а фотографію – на рис. 4.14 [198].

Профілограф-профілометр призначений для зняття інформативного сигналу у вигляді електричних імпульсів про характеристики шорсткості поверхні. Пристрій узгодження необхідний для перетворення параметрів електричних імпульсів (зокрема, напруги) до значень, з якими може працювати аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). АЦП за допомогою відповідного програмного забезпечення (наприклад, програми, написаної мовою Q-Basic) перетворює аналоговий сигнал у цифровий формат [191, 192].

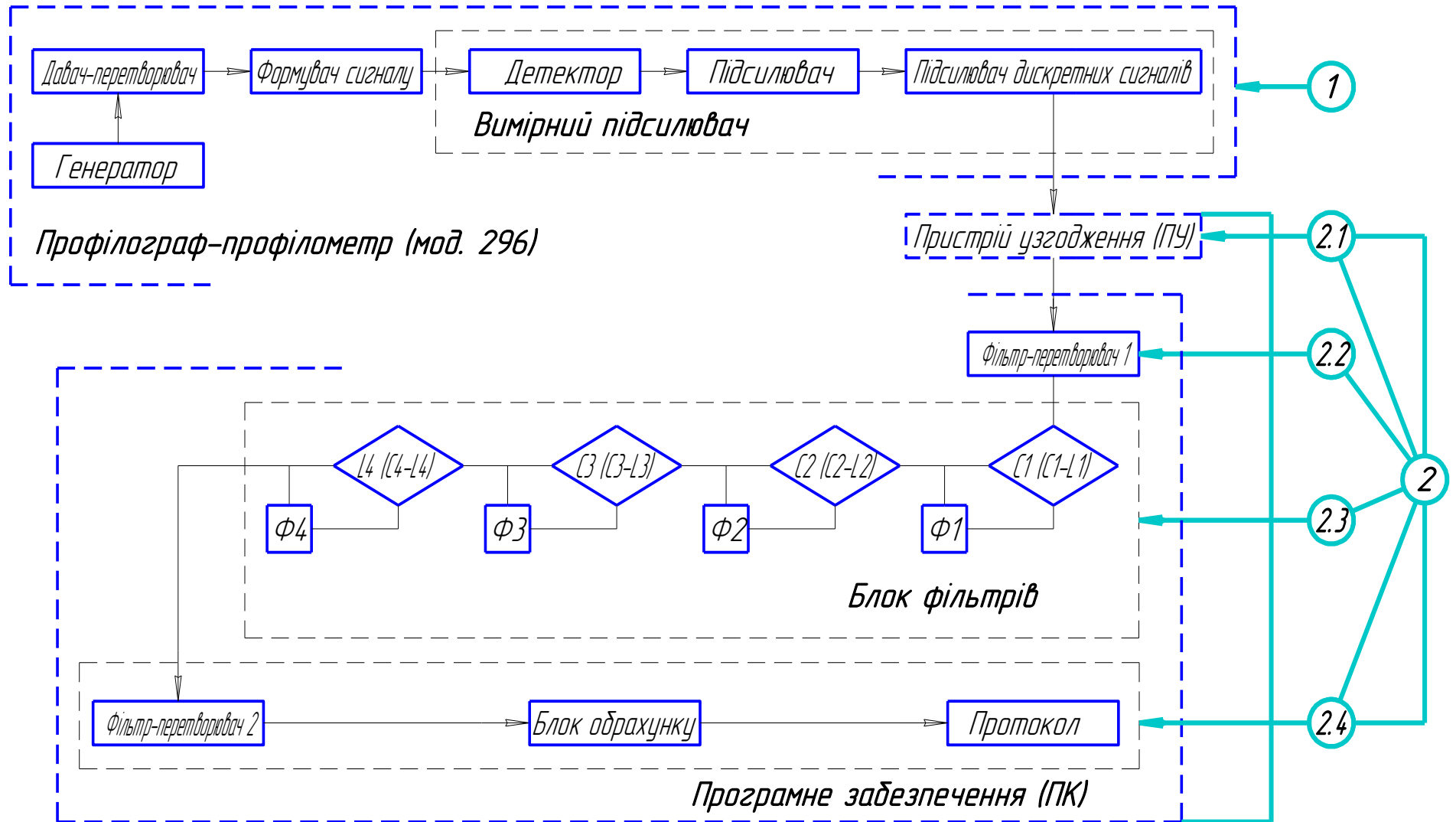


Рис. 4.12. Модернізована принципова схема комплексу контролю шорсткості

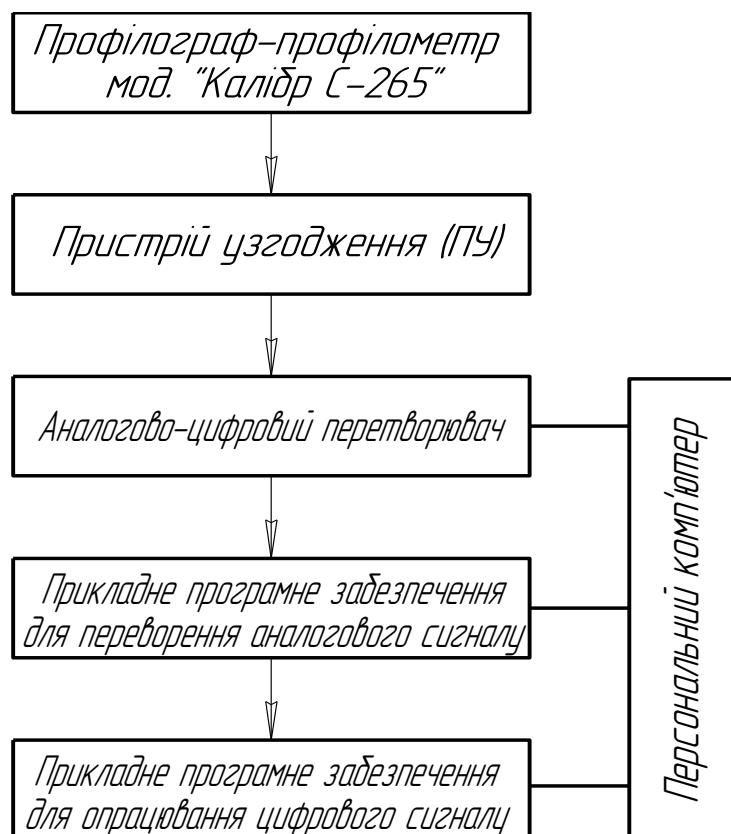


Рис. 4.13. Принципова схема вимірного комплексу для проведення експериментальних досліджень



Рис. 4.14. Комплекс для вимірювання геометричних параметрів якості поверхні виробів

Для автоматичної побудови опорної кривої поверхні створено модуль *StrengthPlot*, що включає функції *GetLengthAtExtr2* (визначення $\Delta \ell_i$), *GetLengthOnHeightY* (визначення $\Delta \ell$), *PsetRezLine* (), *PsetRezPoint* (), *ShowGrid* (виведення графіка в діалоговому вікні). Модуль *GetRealValues* призначений для перетворення відносних координат в реальні (мкм) і розрахунку геометричних параметрів профілю поверхні ($R_a, R_z, r, L, R_{max}, R_q, R_p, S, S_m$). Результати розрахунку зберігають в окремому файлі [192].

Експериментальні дослідження проведено на машині об'ємного вібраційного оброблення. До проведення дослідів визначено вихідну шорсткість поверхні дослідного зразка, отриману після токарного оброблення.

Перед обробленням деформівні тіла змочено водою для зменшення тертя та покращання умов обкочування. За установкою зібрано вузол із оброблюваної деталі, деформівних тіл і обкатника, після чого закріплено його на установці.

Параметри режимів оброблення: амплітуда коливань контейнера – $A=4$ мм; осьовий хід обкатника – 2-5 мм; заповнення робочого об'єму деформівними тілами між внутрішньою поверхнею втулки та зовнішньою поверхнею обкатника – 0,75-0,85 [201].

Тривалість оброблення на кожному переході – 10-15 хв.

При обробленні визначено частоту обкочувального руху зміцнювача, шляхом відліку кількості обертів за хвилину диска додаткової маси, що встановлений на вісі обкатника за допомогою мітки на його поверхні. Після оброблення деталі оснащення розібрано та визначено геометричні параметри шорсткості за допомогою вимірювального комплексу, приведенного на рис. 4.13, 4.14, та із застосуванням комп'ютерної програми *Roughness Plot Analyzer* [192].

Основні характеристики профілю поверхні, що виміряно під час експериментальних досліджень, регламентовано ISO 4287.

Розподіл матеріалу в шорсткому шарі твердого тіла характеризує опорна крива профілю поверхні, яка будується в безрозмірних величинах.

В процесі експериментальних досліджень замінено матеріал заводських втулок – сталь 70, сталь 40Х на сталь 20, сталь 45.

Оброблення ВВО_a здійснено у такій послідовності:

- 1) оброблення деформівними тілами – стальними загартованими кульками Ø 10 мм;
- 2) зміцнення внутрішньої поверхні виробів кульками Ø 8,5 мм;
- 3) очищення обробленої поверхні від бруду після попередніх обробок за допомогою ураліту;
- 4) модифікування поверхні тврдосплавним покриттям ВК8 для підвищення зносостійкості.

4.3.3. Експериментальне дослідження технологічного успадкування параметрів якості (виконавчих) функціональних циліндричних поверхонь виробів

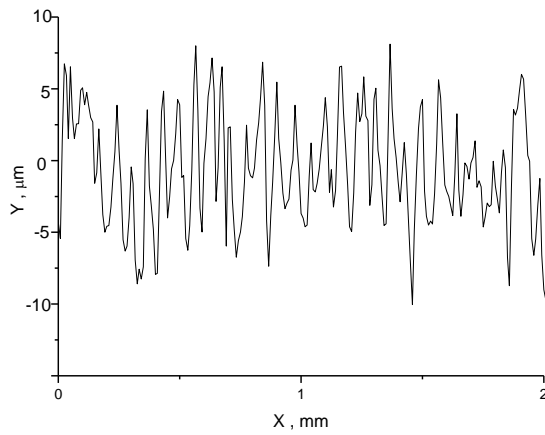
Результати експериментальних досліджень параметрів мікрорельєфу поверхні приведено у табл. 4.8, побудову профілограм виконано на рис. 4.15.

Таблиця 4.8

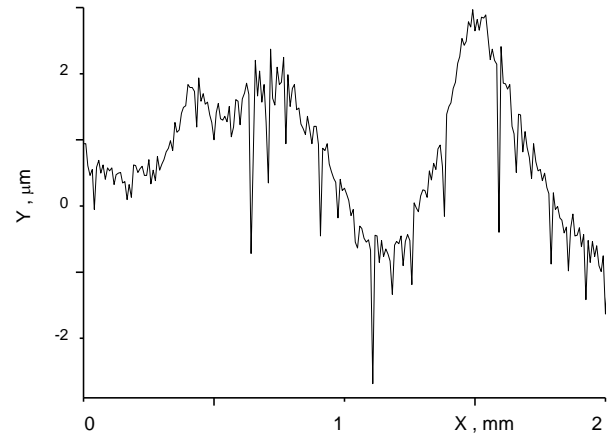
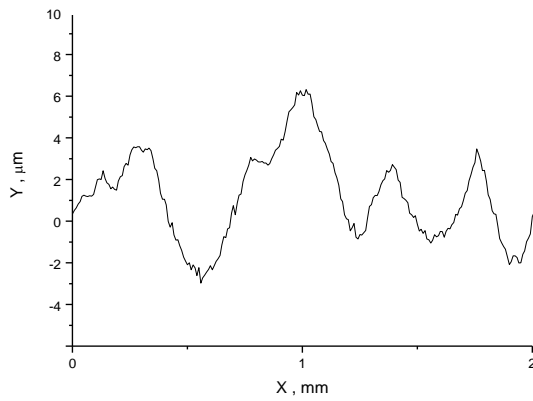
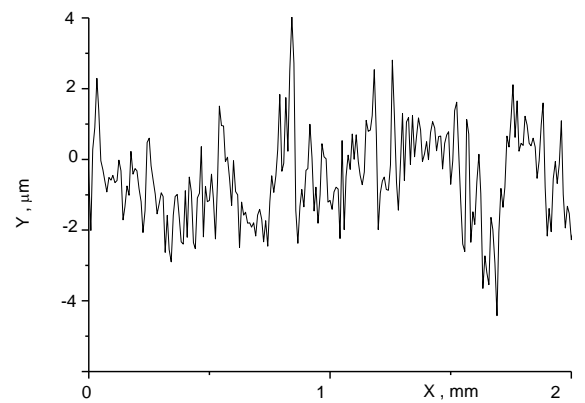
Зміна параметрів рельєфу поверхні у процесі оброблення ВВО_a

| Послідовність віброоброблення | Параметри рельєфу поверхні, мкм | | | | |
|---|---------------------------------|-----------|-------------|----------|----------------------|
| | <i>Ra</i> | <i>Rz</i> | <i>Rmax</i> | <i>S</i> | <i>S_m</i> |
| відправна поверхня після точіння | 4,0093 | 12,7439 | 15,520 | 72,2194 | 79,4332 |
| оброблення кульками Ø 10 мм | 0,5487 | 2,1325 | 3,0464 | 50,54 | 288,0 |
| оброблення кульками Ø 8,5 мм | 0,8774 | 4,1734 | 6,8524 | 128,737 | 358,33 |
| очищення уралітом | 1,0470 | 4,1642 | 4,9040 | 45,6760 | 112,90 |
| модифікування поверхні тврдим сплавом ВК8 | 0,6915 | 1,3829 | 3,1914 | 29,7087 | 85,3398 |

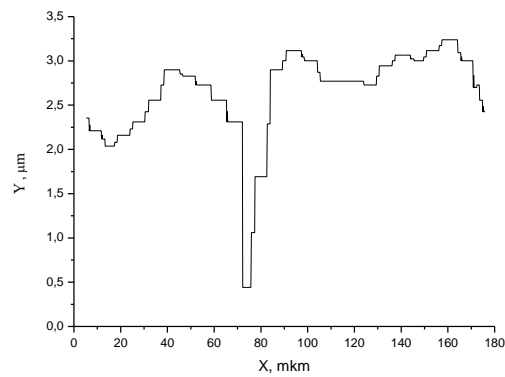
Результати опрацювання комп'ютерною програмою *Roughness Plot Analyzer* профілограм відправної та з нанесеним тврдосплавним покриттям поверхонь приведено на рис. 4.16.



а) профілограма відправної поверхні

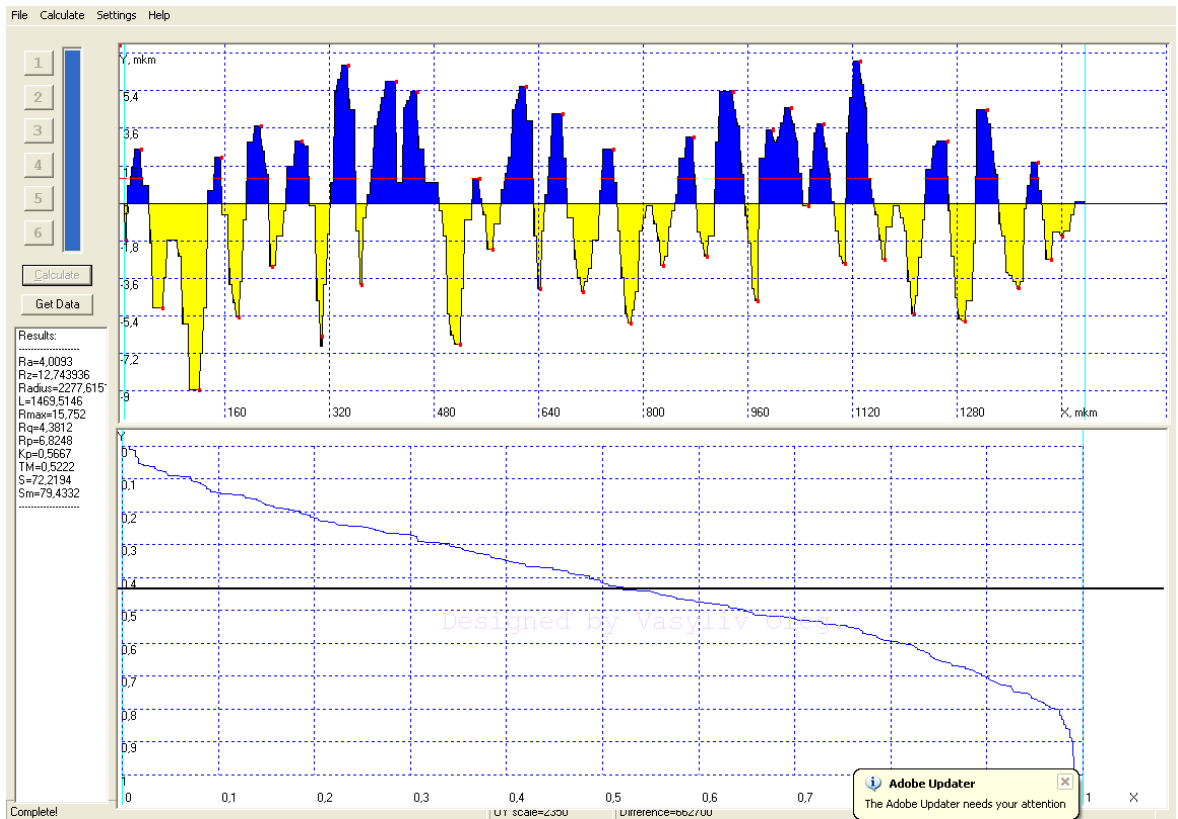
б) оброблення кульками \varnothing 10 ммв) оброблення кульками \varnothing 8,5 мм

г) очищення уралітом

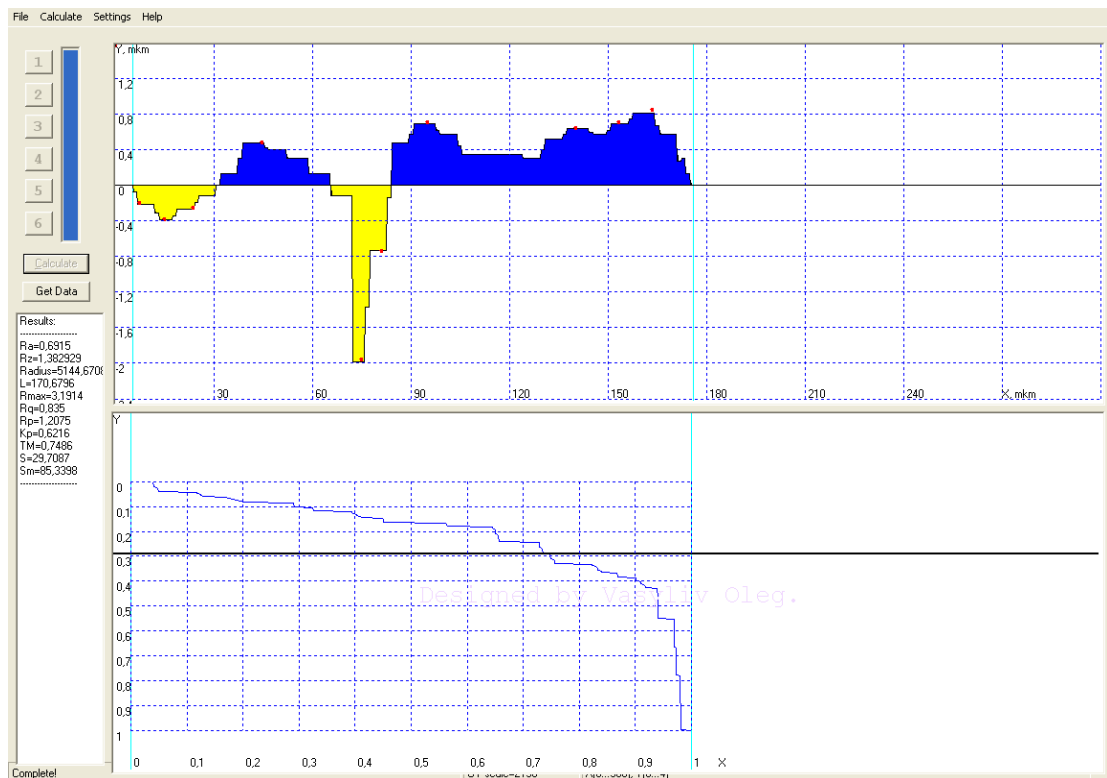


д) модифікування поверхні ВК8

Рис. 4.15. Профілограми поверхні після переходів ВВО_а



a)



б)

Рис. 4.16. Результати комп'ютерного опрацювання профілограм відправної а) та з нанесеним твёрдосплавним покриттям б) поверхонь.

Результати статистичного опрацювання експериментальних досліджень приведено на рис. 4.17, 4.18.

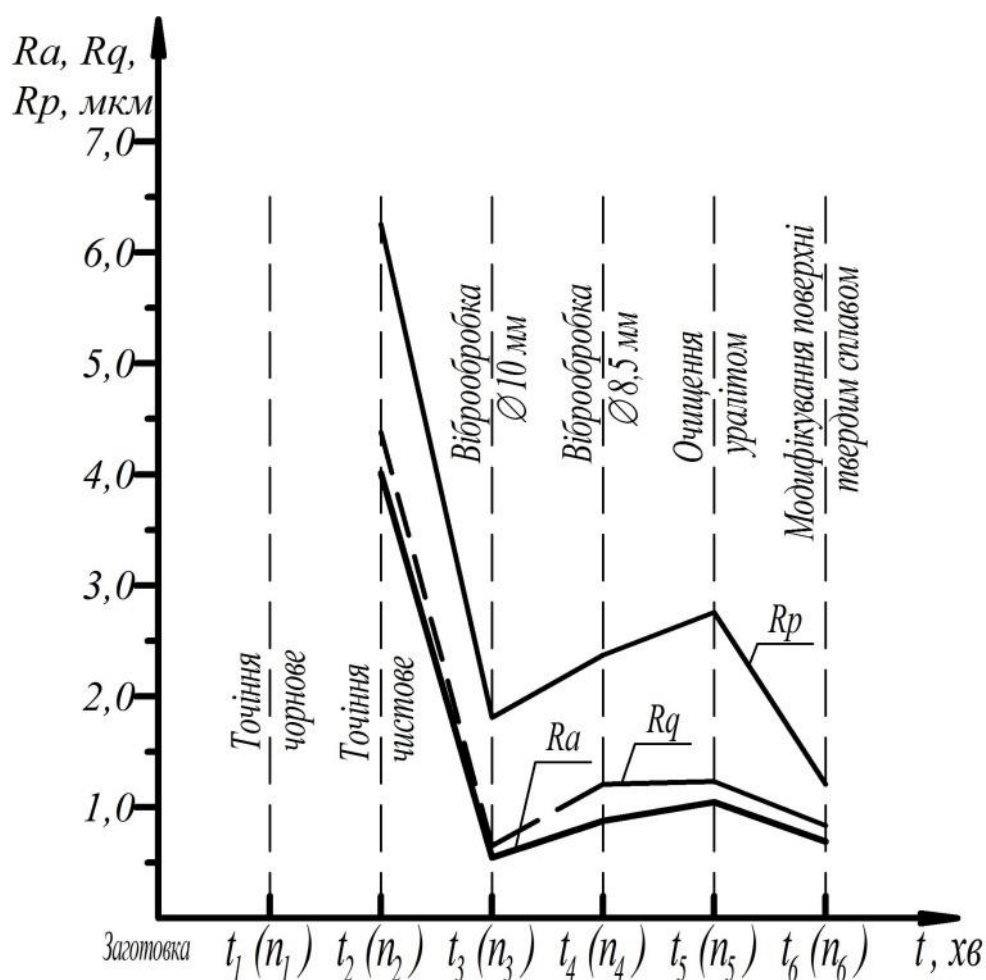


Рис. 4.17. Технологічне успадкування висотних (Ra, Rq, Rp) параметрів якості поверхні втулки бурової помпи ($t_1(n_1), t_2(n_2), \dots, t_6(n_6)$ – тривалість 1, 2, ... 6-го технологічних переходів)

Принцип технологічного успадкування властивостей виробів в умовах самоорганізації технічних систем реалізовується для підсистем різних рівнів – технологічної операції в межах технологічного процесу виготовлення виробу; технологічного переходу в межах технологічної операції механічного оброблення або обробки тиском.

У дисертаційній роботі аналізується технологічне успадкування властивостей для технологічних переходів як підсистем вікінчувально-зміцнювальної технологічної операції.

Встановлено, що внаслідок оброблення втулки ВВО_а після віброоброблення кульками $\varnothing 10$ мм істотно зменшуються висотні параметри її виконавчої поверхні (R_a , R_z , R_q , R_p) – у 3,78-7,29 разів (табл. 4.8, рис. 4.17), однак залишаються необроблені ділянки профілю, що спостерігається візуально і про що свідчить практично незмінне значення відносної опорної довжина профіля по середній лінії tm . Подальше почергове оброблення кульками $\varnothing 8,5$ мм та очищення поверхні уралітом призводять до погіршення висотних параметрів якості поверхневого шару (табл. 4.8, рис. 4.17), однак підвищується параметр tm (з 0,5287 до 0,5638-0,5870) (табл. 4.8, рис. 4.18). Модифікування поверхні твердим сплавом ВК8 покращує як висотні параметри профілю виконавчої поверхні (табл. 4.8, рис. 4.17), так і значення tm (з 0,5222 (після чистового точіння) до 0,7486) (табл. 4.8, рис. 4.18), що сприяє формуванню стійкого до зношування експлуатаційного рельєфу.

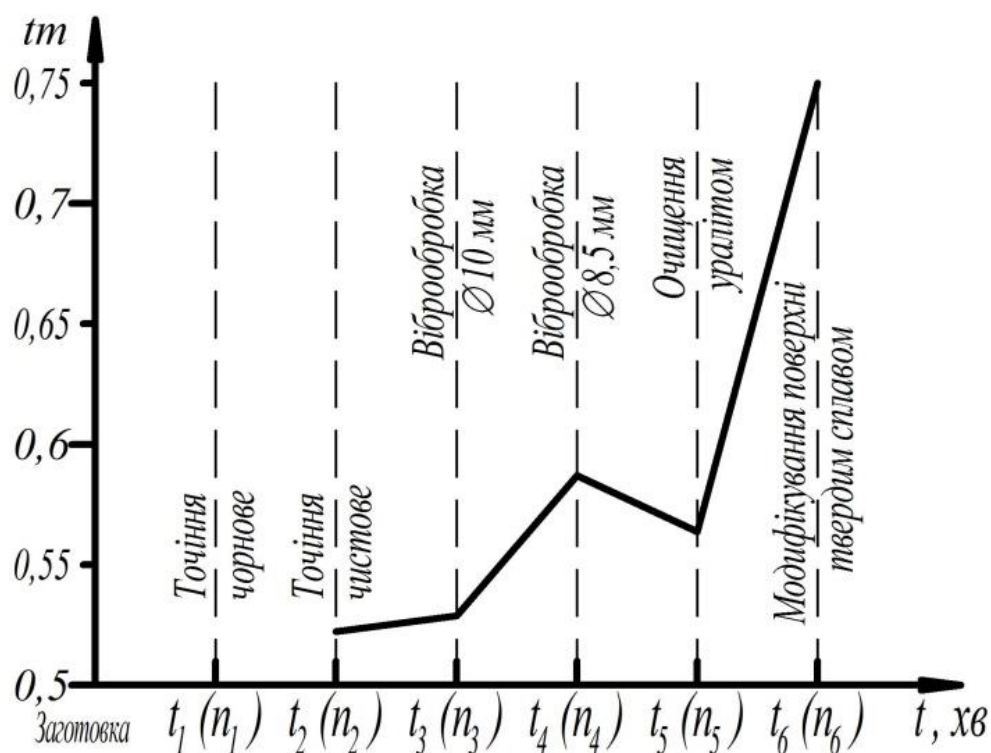


Рис. 4.18. Технологічне успадковування відносної опорної довжини профіля по середній лінії профіля tm для виконавчої поверхні втулки бурової помпи ($t_1(n_1)$, $t_2(n_2)$, ..., $t_6(n_6)$ – тривалість 1, 2, ..., 6-го технологічних переходів)

4.3.4. Аналіз натурних випробувань втулок бурових pomp

Оброблені вібраційно-відцентровим зміцненням втулки бурових pomp із сталі 20 та оригінальні втулки із сталі 70 у парі встановлено на бурові помпи. Під час натурних випробувань зафіксовано напрацювання втулок до відмови, результати приведено у табл. 4.9. Акт про проведення випробувань приведено у дод. А.

Таблиця 4.9

Результати натурних випробувань втулок бурових pomp

| | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Напрацювання базової втулки T_i | 420 | 405 | 417 | 410 | 391 | 415 | 382 | 389 | 408 | 417 |
| Напрацювання віброзміцненої втулки T_i | 752 | 643 | 683 | 708 | 630 | 638 | 609 | 651 | 674 | 706 |

Середнє напрацювання втулки до відмови $T_{сер.}$ визначають за формулою:

$$T_{сер.} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i + N_{безвідм.} \cdot T_{випр.}}{N} \quad (4.5)$$

де n – число виробів, що відмовили за час випробувань; t_i – напрацювання кожного виробу, що відмовив; $N_{безвідм.}$ – число виробів, що безвідмовно пропрацювали протягом часу випробувань, $T_{випр.}$ – тривалість випробування (або сумарне напрацювання в експлуатації).

Для визначення $T_{сер.}$ час випробувань прийнято рівним – для базової втулки $T_{випр.}=420$ год, для зміцненої $T_{випр.}=752$ год.

Для базової втулки:

$$T_{сер.} = \frac{405 + 417 + 410 + 391 + 415 + 382 + 389 + 408 + 417 + 1 \cdot 420}{10} = 405,4 \text{ год.}$$

Для зміцненої втулки:

$$T_{сер.} = \frac{643 + 683 + 708 + 630 + 638 + 609 + 651 + 674 + 706 + 1 \cdot 752}{10} = 669,4 \text{ год.}$$

У ході проведення натурних випробувань віброзміцнених втулок разом із виготовленими по традиційній технології встановлено підвищення середнього

напрацювання на відмову віброзміцненої втулки у середньому на 65 %. Крім того заміна матеріалу із сталі 70, 40X на сталь 20 дає економічний ефект по вартості матеріалу.

4.4. Висновки розділу 4

1. Розвиток функціонально-орієнтованих технологій пов'язаний із розробленням нових і вдосконаленням існуючих комбінованих і гібридних технологічних обробок для забезпечення регламентованих параметрів якості виробів та підвищення їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності. При цьому синтез гібридних технологій базується на перетині відомих принципів створення технологій принципів і формуванні якісно нових властивостей виробів.

2. При чорновому обробленні заготовок у піщано-глинисті форми із алюмінієвого сплаву АК збільшення кута врізання з 5° до 8° , головного переднього кута: радіального з 9° до $10,5^\circ$, осьового з $5,5^\circ$ до $13,5^\circ$, кута підйому рівця з 35° до 45° кінцевих фрез для напівчистового оброблення порівняно із чорновими фрезами, що традиційно застосовують для попередньої обробки на першому переході оброблення вилівка, забезпечує формування висотних параметрів мікропрофілю (Ra , Rq), характерного для напівчистої/чистої обробки. Із збільшенням швидкості різання із $V_{piz.}=58,43$ м/хв до $V_{piz.}=218,65$ м/хв для чорнового фрезерування відбувається погіршення якості поверхневого шару вилівка за параметрами Ra , Rq . Висота згладжування Rp різко зменшується для $V_{piz.}=58,43-100,53$ м/хв, потім зростає для $V_{piz.}=100,53-218,66$ м/хв. Значення крокових характеристик мікропрофілю $S=0,136-0,183$ мкм, $Sm=0,196-0,253$ мкм свідчить про відсутність «оливних кишень» на сформованому мікрорельєфі.

3. При напівчистовому обробленні зменшення кута врізання з 8° до 5° , головного переднього кута: радіального з $10,5^\circ$ до 9° , осьового з $13,5^\circ$ до $5,5^\circ$, кута підйому рівця з 45° до 35° кінцевих фрез для чорнового оброблення порівняно із фрезами для напівчистої обробки на другому переході

оброблення виливка супроводжується погіршенням якості поверхні за висотними характеристиками (Ra , Rq , Rq). Поряд з тим із збільшенням швидкості різання від $V_{piz.}=58,43$ м/хв до $V_{piz.}=218,66$ м/хв відбувається покращання якості поверхневого шару виливка за параметрами Ra , Rq . Висота згладжування Rp збільшується для $V_{piz.}=58,43-100,53$ м/хв, потім різко спадає для $V_{piz.}=100,53-182,21$ м/хв, знову зростає для $V_{piz.}=182,21-218,66$ м/хв. Крокові характеристики мікропрофілю (S , Sm) порівняно із першим переходом змінюються кардинально: від $S=0,136-0,183$ мкм, $Sm=0,196-0,253$ мкм при чорновому обробленні до $S=14,988-19,581$ мкм, $Sm=15,558-24,685$ мкм при напівчистовій обробці, що, поряд із погіршенням параметрів Ra і Rz , свідчить про формування «оливних кишень» на сформовану мікрорельєфі.

4. Після чорнового фрезерування алюмінієвого виливка у піщано-глинясті форми кінцевими фрезами для напівчистої обробки фірми «Sandvik» $\varnothing 6-12$ мм та напівчистового фрезерування кінцевими фрезами для чорнової обробки фірми «Sandvik» відповідного діаметра на вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL опорна довжина профіля по середній лінії tm збільшується при переході від чорнового до напівчистового оброблення для фрез $\varnothing 6$ мм і $\varnothing 12$ мм і незначно зменшується для фрез $\varnothing 8$ мм і $\varnothing 10$ мм. Застосування нетипового для даного виду обробки виду металорізального інструменту у технологічних маршрутах оброблення виливків із алюмінієвого сплаву приводить до покращання висотних параметрів мікрорельєфу профіля при чорновому обробленню та їх погіршенню при подальшому обробленні і до істотного збільшення значень характеристик кроку (S , Sm) при переході від чорнового до напівчистового оброблення. Для роботи в умовах зношування найраціональніше поєднання Ra , Sm , tm забезпечується для кінцевої фрези $\varnothing 12$ мм. Для циклічних знакозмінних навантажень при втомі найбільше значення $S=19,581$ мкм отримують для кінцевої фрези $\varnothing 8$ мм, а регламентовану міцність зчеплення з покриттям забезпечить кінцева фреза $\varnothing 10$ мм.

5. Після чорнового та напівчистового фрезерування алюмінієвого виливка у піщано-глинисті форми кінцевими фрезами фірми «Sandvik» на

вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL за параметрами мікрорельєфу визначали параметри кривої Аббота ν , b , tm . При реалізації технологічного маршруту оброблення алюмінієвої заготовки: чорнове фрезерування напівчистовими фрезами, напівчистове фрезерування чорновими фрезами і аналізі за зміною показників ν , b на першому технологічному переході формується мікрорельєф поверхні, що описується параметрами кривої Аббота, характерних як для попередньої (фрезерування), так і для фінішної обробки (шліфування). На другому технологічному переході в основному (за винятком $\varnothing 10$ мм) формується мікрорельєф поверхні, характерний для фінішної та викінчувальної обробок. При аналізі зміни показників кривої Аббота для двох почергових переходів механічної обробки при реалізації технологічного маршруту оброблення поверхонь виробу за критерієм tm формування параметрів мікрорельєфу відповідає фінішній (шліфування) та викінчувальній (полірування, доводка) обробкам.

6. Експлуатаційні характеристики деталей і спряжень (зносостійкість, втомна міцність, міцність з'єднання, корозійна стійкість тощо) безпосередньо пов'язані із геометричними параметрами якості виконавчих (функціональних) поверхонь виробів, які визначають на підставі опрацювання результатів експериментальних досліджень. Після фрезерування алюмінієвого вилівка у піщано-глинисті форми кінцевими фрезами фірми «Sandvik» на вертикально-фрезерному центрі з ЧПК HAAS MINIMILL встановлено, що для роботи в умовах зношування найраціональніше поєднання параметрів мікропрофілю Ra , Sm , tm забезпечується для кінцевої фрези $\varnothing 12$ мм. Для циклічних знакозмінних навантажень при втомі найбільше значення $S=19,581$ мкм отримують для кінцевої фрези $\varnothing 8$ мм, а регламентовану міцність зчеплення з покриттям забезпечить кінцева фреза $\varnothing 10$ мм.

7. Застосування комбінованих методів обробок як ефективного засобу реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування забезпечується в умовах самоорганізації системи механічної обробки деталей машин використанням двох і більше одночасних варіантів простих методів

технологічного впливу елементів системи ВПД(З). Адаптований під вібронашину об'ємної обробки розроблений у Національному університеті «Львівська політехніка» метод вібраційно-відцентрового зміцнення забезпечує регламентовані параметри якості, необхідні експлуатаційні характеристики та показники надійності за рахунок сумісного впливу коливань і взаємодії із оброблюваною поверхнею твёрдосплавного середовища. Запропонована технологія реалізується взаємозв'язками та закономірностями підсистеми модифікування поверхні при поверхневому пластичному деформуванні (PSPAS-SPD/S/ТИ) внаслідок взаємовпливу підсистем поверхневого пластичного деформування (PSPAS-SPD), аналізу модифікування поверхневого шару виробу (PSPAS-S) і аналізу технологічного успадковування при формоутворенні виробу (PSPAS-ТИ).

8. Встановлено, що при наявності “бар'єрів” у структурі технологічного процесу виготовлення виробів, зокрема термічного оброблення або поверхневого пластичного деформування, в умовах самоорганізації технологічних систем принцип технологічного успадковування властивостей виробів реалізується для технологічних переходів в межах наступної технологічної операції механічного оброблення або обробки тиском.

9. В результаті заміни у технологічних процесах методів абразивної обробки на вібраційно-відцентрове зміцнення, реалізоване на вібронашинах об'ємного оброблення, при виготовленні втулок циліндрових бурових pomp відбувається покращення параметрів мікрорельєфу виконавчої внутрішньої циліндричної поверхні, що працює в умовах інтенсивного зношування. В результаті віброброблення 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 що свідчить практично незмінне значення відносної опорної довжина профіля 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 (табл. 4), так і значення tm (з 0,5222 (після чистового точіння) до 0,7486), що сприяє формуванню стійкого до зношування експлуатаційного рельєфу. Ефективність реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування при виготовленні втулок циліндрових бурових pomp НБ-32 апробовано під час натурних випробувань, в результаті чого середнє напрацювання на відмову віброзміцнених втулок підвищилося у середньому на 65 % при заміні матеріалу вхідної заготовки із сталі 70, 40Х на сталь 20, 45.

РОЗДІЛ 5.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ВИРОБІВ ЯК РЕЗУЛЬТАТ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСПАДКОВУВАННЯ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ ВПД(З)

5.1. Розроблення алгоритму формування регламентованих параметрів якості виробу із врахуванням впливу елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)»

Під час виготовлення машинобудівних виробів технологічне забезпечення їхніх регламентованих параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності визначається множиною взаємозв'язків і взаємовпливів елементів технологічної системи ВПД(З). Металорізальний верстат, верстатний пристрій, металорізальний інструмент як складові елементи технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» характеризується регламентованими параметрами надійності під час механічного оброблення заготовки виробу (елемента системи ВПД(З)) та складанні машини.

Одним з методів математичного моделювання та аналізу показників надійності фізичних процесів, є математичний апарат марковських процесів [313, 314]. Ланцюгами Маркова описують та аналізують зміну показників надійності технічних систем, що можуть перебувати лише у двох станах: працездатному (робочому) та непрацездатному. Ланцюги Маркова описують ймовірність переходу між можливими станами технічної системи у часі, зокрема для систем [3]:

- з паралельними незалежними компонентами;
- з послідовними незалежними компонентами;
- з розподіленим навантаженням;
- резервованих;
- деградованих.

Прогнозування впливу елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» на забезпечення параметрів якості машинобудівних виробів здійснюють за розробленою методикою:

- 1) аналіз технологічного процесу виготовлення виробу для забезпечення показників надійності машинобудівних виробів;
- 2) визначення можливих станів системи відповідно до забезпечення регламентованих показників якості виробів, їхніх експлуатаційних характеристик і показників надійності;
- 3) розроблення технологічних графів надійності для аналізу кожного з можливих станів підсистем;
- 4) визначення інтенсивностей відмов для переходу між можливими станами підсистем;
- 5) побудова математичних моделей для опису можливих станів підсистем із застосуванням системи диференційних рівнянь Колмогорова-Чепмена;
- 6) визначення крайових умов та розв'язок системи диференційних рівнянь у загальному та числовому вигляді;
- 7) аналіз отриманих результатів і розроблення рекомендацій (за потреби) для коректування технологічного процесу виготовлення машинобудівного виробу.

Структурну схему забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі при її механічному обробленні на i -тій технологічній операції механічного оброблення із врахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(З): металорізального верстата, верстатного пристрою та металорізальних інструментів приведено на рис. 5.1.

Технологічний процес як технічну систему досліджено при аналізі параметрів підсистем першого порядку (технологічні операції) та підсистем другого порядку (технологічні переходи).

На початковому етапі досліджень визначаються регламентовані параметри надійності елементів технологічної системи ВПД(З) при обробленні

визначених машинобудівних виробів на різних рівнях підсистем технічної системи (технологічного процесу): технологічна операція, технологічний перехід, робочий хід. Після цього для визначеної технологічної операції будують блок-схему надійності із врахуванням впливу елементів системи ВПД(З) на формування регламентованих параметрів виробу. На підставі блок-схеми надійності для кожної технологічної операції виготовлення виробу розробляють технологічний граф надійності із використанням ланцюгів Маркова. Для побудованих технологічних графів надійності для кожної технологічної операції визначають інтенсивності відмов для елементів технологічної системи ВПД(З).

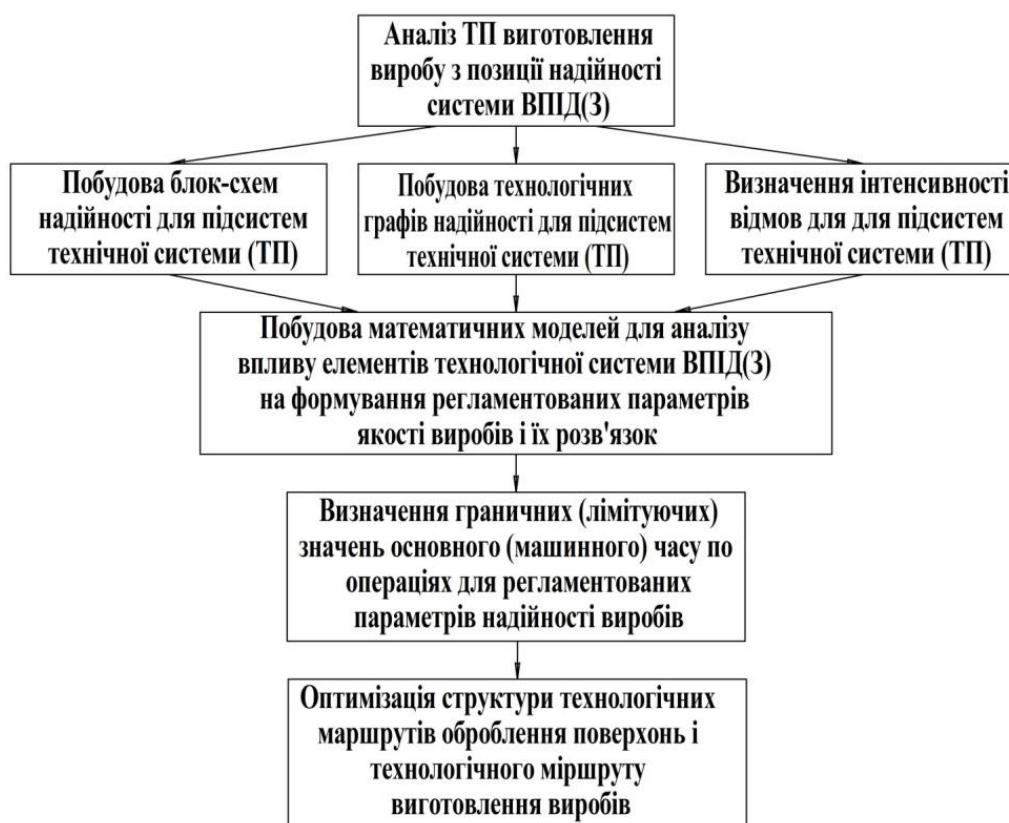


Рис. 5.1. Структурна схема забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки деталі при її механічному обробленні на i -тій технологічній операції із врахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(З)

Для побудованих технологічних графів розробляється система диференціальних рівнянь для прогнозування забезпечення регламентованих

параметрів якості заготовки деталі при її механічному обробленні на i -тій технологічній операції механічного оброблення із врахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(З). Із врахуванням крайових умов знаходять розв'язки диференціальних рівнянь у параметричному та числовому вигляді.

За отриманими значеннями показників надійності виробу розв'язують оптимізаційну задачу синтезу режимів оброблення. Критерієм оптимізації є граничне значення основного (машинного) часу на визначеному технологічному переході або технологічній операції, встановлене за розрахованими та регламентованими параметрами безвідмовності чи довговічності (ймовірність безвідмовної роботи, гаммі-відсоткове напрацювання до відмови, ресурс тощо).

Основний час на технологічному переході чи технологічній операції є функцією режимів механічного оброблення виробу.

На підставі розв'язку оптимізаційної задачі визначають граничні (лімітуючі) значення основного (машинного) часу для регламентованих параметрів надійності виробу та за потреби коректують структуру технологічного маршруту оброблення поверхонь, режими різання, структуру технологічної операції зокрема та оптимізують структуру технологічного процесу загалом.

5.2. Дослідження технологічного процесу виготовлення виробу з позиції забезпечення надійності елементів технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – заготовка»

Технологічний процес виготовлення машинобудівного виробу містить технологічний процес виготовлення заготовки деталі і технологічний процес її механічного оброблення. Аналіз ТП заготівельного виробництва є важливим етапом виготовлення виробу, проте з огляду на складність здійснення теоретико-експериментальних досліджень не є предметом досліджень дисертаційної роботи. Поряд з тим технологічні дефекти у матеріалі заготовки,

що сформувалися під впливом нераціональних режимів плавки металу, неоптимальної конструкції ливарної форми, формування структурних концентраторів напружень внаслідок технологічного успадковування властивостей, розвиваються під час обробки різанням і перероджуються у пошкодження за несприятливих умов експлуатації.

5.2.1. Забезпечення показників надійності основного технологічного обладнання при проєктуванні технологічних процесів виготовлення машинобудівних виробів

Вимоги до забезпечення показників надійності металорізальних верстатів різних типів істотно відрізняються. Найвагоміше значення із комплексу технічних вимог для універсальних легких і середніх верстатів має технічний ресурс. Для важких верстатів важливе значення має безвідмовність протягом тривалого часу і безвідмовність системи протягом однієї операції при обробці точних і вартісних деталей машин. До надійності спеціальних і унікальних верстатів ставлять вищі вимоги порівняно з універсальними [264].

Технологічною надійністю верстата є його здатність зберігати показники якості технологічного процесу (точність оброблення та якість виконавчих і спряжених поверхонь) протягом визначеного терміну часу [258, 259]. У той же час точність оброблення та якість поверхневого шару поверхонь виробів залежать від взаємовпливів інших елементів системи ВПД(З): технологічного оснащення, металорізального інструменту та заготовки [256, 272].

Раптові відмови металорізальних верстатів визначаються несприятливим поєднанням технологічних параметрів. Зокрема, розсіювання ресурсу за критерієм втоми для підшипників досягає 40, для зубчастих передач 10-15. Істотне розсіювання мають робочі навантаження, механічні характеристики матеріалів і деталей, зазори/натяги у спряженнях виробів тощо. Тому при дослідженні характеристик надійності розглядають випадкові величини неперервного або дискретного типу.

У загальному випадку ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу

виготовлення виробу при недосягненні граничного стану металорізальним верстатом загалом або його елементами зокрема $P_{MPB_i}(r, k, \dots, t)$ визначається за формулою:

$$P_{MPB_i}(r, k, \dots, t) = \int_{t=T}^{\infty} f_{MPB}(r, k, \dots, t) dt, \quad (5.1)$$

де $f_{MPB}(r, k, \dots, t)$ – закон розподілу для напрацювання основного технологічного обладнання при забезпеченні j -ого параметра на i -тій технологічній операції.

За умови змінної t вираз (5.1) трансформується у залежність:

$$P_{MPB_i}(t) = \int_{t=T}^{\infty} f_{MPB}(t) dt, \quad (5.2)$$

де $f_{MPB}(t)$ – диференційний закон розподілу (густина ймовірності) для напрацювання основного технологічного обладнання (верстата) при технологічному забезпеченні регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції.

У загальному випадку незабезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при досягненні граничного стану металорізальним верстатом загалом або його елементами зокрема $F_{MPB_i}(r, k, \dots, t)$ визначається за формулою:

$$F_{MPB_i}(t) = 1 - P_{MPB_i}(t). \quad (5.3)$$

До регламентованих параметрів надійності металорізальних верстатів відносять гамма-відсоткове напрацювання до відмови (t_γ) – це напрацювання, протягом якого відмова об'єкту не виникає із ймовірністю γ (%). Його визначають за формулою:

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}, \quad (5.4)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи металорізального верстата.

При $\gamma=100$ % гамма-відсоткове напрацювання називається встановленим безвідмовним напрацюванням T_γ , при $\gamma=50$ % медіанним напрацюванням.

Функція розподілу $F(t)$ напрацювання до відмови (ресурсу, терміну служби):

$$F(t_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad (5.5)$$

Гамма-відсоткові показники дорівнюють квантилям відповідних розподілів, що випливає з формули (5.5).

Задані значення γ для критичних відмов повинні бути дуже близькі до 100%, щоб зробити критичні відмови практично неможливими подіями. Для прогнозування потреби в запасних частинах, ремонтних потужностях, а також для розрахунку поповнення і оновлення парків машин, приладів і установок застосовують гамма-процентні показники при більш низьких значеннях γ , наприклад при $\gamma=50\%$, що приблизно відповідає середнім значенням.

Величину $P(t_\gamma) = 1,00; 0,99; 0,95; 0,90; 0,80; 0,50$ регламентовано стандартами залежно від відповідальності елемента та його вартості.

Для експоненціального закону розподілу напрацювань T_i встановлене безвідмовне напрацювання розраховується за формулою:

$$T_\gamma = (1 - \gamma) \cdot T_0, \quad (5.6)$$

де T_0 – середнє напрацювання на відмову (відношення напрацювання відновлюваного об'єкта до математичного сподівання числа його відмов протягом цього напрацювання. Для сукупності партії об'єктів:

$$T_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n T_{ij}}{\sum_{j=1}^N n_j}, \quad (5.7)$$

Показник T_0 визначає напрацювання об'єкта, що припадає на одну відмову.

У практиці машинобудування при визначенні гамма-відсоткового напрацювання до відмови (t_γ) і встановленого безвідмовного напрацювання T_γ

використовують найчастіше нормальний закон розподілу ресурсу виробу і закон Вейбулла (РД 26-01-143-83).

При нормальному розподілі ресурсу виробу (РД 26-01-143-83):

$$P(t) = F_0(x) = F_0\left(\frac{T_{cp} - t}{T_{cp} \cdot \nu}\right), \quad (5.8)$$

гамма-відсотковий ресурс елемента визначається за формулою (РД 26-01-143-83):

$$T_\gamma = T_0 \cdot (1 - x \cdot \nu) \text{ [Год]}, \quad (5.9)$$

де x – визначається залежно від $\gamma = [F_0(x)]$.

У загальному випадку для нормального закону розподілу встановлено безвідмовне напрацювання T_γ [336]:

$$T_\gamma = T_0 + K_\gamma \cdot S, \quad (5.10)$$

де K_γ – квантиль нормального розподілу; де S – середньоквадратичне відхилення напрацювання на відмову.

Зокрема, при $\gamma = 0,95$ згідно табл. 1 $K_\gamma = -1,645$ і формула (5.10) матиме вигляд:

$$T_\gamma = T_0 - 1,645 \cdot S. \quad (5.11)$$

З іншої сторони встановлено безвідмовне напрацювання для розподілу Вейбулла:

$$T_\gamma = a \sqrt[b]{0,0513}, \quad (5.12)$$

де a – параметр масштабу розподілу, b – параметр форми.

При реалізації технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів необхідно забезпечувати умову (2.88):

$$P_{MPB_i}(t) \geq [P_{MPB}(t)], \quad (5.13)$$

де $[P_{MPB}(t)]$ – ймовірність забезпечення визначеного показника надійності металорізального верстата згідно паспортних даних верстата.

5.2.2. Забезпечення показників надійності верстатних пристроїв на металорізальних верстатах при проєктуванні технологічних процесів виготовлення деталей машин

Критерієм доцільності застосування тої чи іншої системи пристроїв служить коефіцієнт завантаження пристроїв $k_{з.факт.}$:

$$k_{з.факт.} = \frac{N_{оп.} \cdot T_{шт.-к.(шт.)}}{\Phi_{Пр.}}, \quad (5.14)$$

де $N_{оп.}$ – число повторів операцій, що відповідає кількості оброблюваних деталей однієї назви протягом календарного періоду (місяця, року); $\Phi_{Пр.}$ – дійсний фонд часу роботи пристрою за вказаний період.

У загальному випадку ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при недосягненні граничного стану пристрою на металорізальному верстаті загалом або його елементами зокрема $P_{МПр_i}(r, k, \dots, t)$ визначається за формулою:

$$P_{МПр_i}(r, k, \dots, t) = \int_{t=T}^{\infty} f_{МПр}(t) dt, \quad (5.15)$$

де $f_{МПр}(t)$ – закон розподілу ресурсу елементів верстатних пристроїв при забезпеченні регламентованих параметрів якості виробу.

Ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при досягненні граничного стану пристрою на металорізальному верстаті загалом або його елементами зокрема $F_{МПр_i}(r, k, \dots, t)$ визначається за формулою:

$$F_{МПр_i}(t) = 1 - P_{МПр_i}(t). \quad (5.16)$$

При реалізації технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів необхідно забезпечувати умову (2.88):

$$P_{МПр_i}(t) \geq [P_{МПр}(t)], \quad (5.17)$$

де $[P_{МПp}(t)]$ – ймовірність забезпечення регламентованого показника надійності пристрою на металорізальному верстаті згідно вимог нормативно-конструкторської документації.

5.2.3. Забезпечення показників надійності металорізальних інструментів під час проектування технологічних процесів виготовлення машинобудівних виробів

Критерієм працездатності та ефективності металорізального інструменту є його стійкість, яка тісно пов'язана із експлуатаційними характеристиками та показниками надійності [68, 96, 315]. Після визначення стійкості розрахунковим шляхом призначаються режими різання і параметри початкового стану інструменту.

Встановлено [215], що стійкість металорізального інструменту є його середнім напрацюванням до відмови.

Стійкість металорізального інструменту T визначається у найпростішому випадку моделлю Тейлора [67, 215]:

$$T_{MCT} = m \sqrt{\frac{C_T}{\nu}}, \quad (5.18)$$

де ν – швидкість різання, м/хв; C_T – константа, що представляє собою швидкість різання при $T=1$ хв; m – поправний коефіцієнт.

Модель (5.18) справедлива для періоду нормального зношування інструменту [215]:

$$T_{MCT} = m \sqrt{\frac{C_{Tv} \cdot \nu \cdot B^n}{h^p \cdot b^q \cdot \nu}}, \quad (5.19)$$

де h, b – товщина та ширина стружки.

У загальному випадку ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при недосягненні граничного стану металорізальним

інструментом загалом або його елементами зокрема $P_{MPI_i}(r, k, \dots, t)$ визначається за формулою:

$$P_{MPI_i}(r, k, \dots, t) = \int_{t=T}^{\infty} f_{MPI}(t) dt, \quad (5.20)$$

де $f_{MPI}(t)$ – закон розподілу ресурсу металорізального інструменту при забезпеченні регламентованих параметрів якості виробу.

Ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості на i -тій технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу при досягненні граничного стану металорізальним інструментом загалом або його елементами зокрема $F_{MPI_i}(r, k, \dots, t)$ визначається за формулою:

$$F_{MPI_i}(t) = 1 - P_{MPI_i}(t). \quad (5.21)$$

При реалізації технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів необхідно забезпечувати умову (2.88):

$$P_{MPI_i}(t) \geq [P_{MPI}(t)], \quad (5.22)$$

де $[P_{MPI}(t)]$ – ймовірність забезпечення регламентованого показника надійності металорізального інструменту згідно вимог нормативно-конструкторської документації.

5.3. Дослідження процесу формування регламентованих параметрів якості виробу із врахуванням впливу технологічної системи верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка) (ВПД(3)) при виготовленні корпусу редуктора К.02.106

Проаналізовано процес формування параметрів надійності із врахуванням впливу технологічної системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» для забезпечення регламентованих показників якості на технологічних операціях і технологічних переходах під час виготовлення машинобудівного виробу – корпусу редуктора К 02.106.

На виробничому підприємстві «Агромашпроект» (м. Львів) деталь «Корпус редуктора К 02.106» виготовляють в умовах дрібносерійного виробництва із використанням універсальних верстатів загального призначення, універсальних та стандартних інструментів, застосуванням верстатних пристроїв до металорізальних верстатів із ручним (гвинтовим, ексцентриковим) приводом із залученням робітників високої кваліфікації.

Технічне нормування технологічного процесу механічного оброблення деталі «Корпус редуктора К 02.106» приведено у дод. Ж.

Заготовкою корпуса редуктора служить вилівок із чавуну СЧ 20 ГОСТ 1412-85. Технологічний маршрут механічного оброблення даної деталі складається із 10 технологічних операцій механічного оброблення. Металорізальний і вимірний інструмент, технологічне оснащення відповідає даному типу виробництва.

На технологічній операції 005 при виконанні технологічного переходу (фрезерування опорної площини) (дод. Ж) усі елементи технологічної системи ВПД(3) забезпечують виконання поставлених конструкторсько-технологічних завдань одночасно: механічне оброблення заготовки здійснюють одним металорізальним інструментом (МРІ) на визначеному металорізальному верстаті (МРВ) при її базуванні та закріпленні в одному пристрої (МПр).

Тому: $\lambda_{МРВ_005}$; $\lambda_{МПр_005}$; $\lambda_{МРІ_005} \in [0; t_0]$, де t_0 – основний час на виконання даної технологічної операції; $t_0=1,48$ хв (дод. Д).

Для побудови математичних моделей прогнозування впливу елементів технологічної системи ВПД(3) на забезпечення регламентованих параметрів якості виробів застосовуємо математичний апарат ланцюгів Маркова.

Технологічний граф надійності для аналізу процесу формування параметрів надійності із врахуванням впливу технологічної системи ВПД(3) при забезпеченні регламентованих показників якості на технологічній операції 005 Горизонтально-фрезерна оброблення корпуса редуктора К 02.106 приведено на рис. 5.2.

Вершини технологічного графа надійності (рис. 5.2) описують можливість перебування технічної системи для даної технологічної операції у чотирьох можливих станах: 1 – елементи технологічної системи ВПД(З): металорізальний верстат (МРВ), пристрій на металорізальному верстаті (МПр), металорізальний інструмент (МРІ) не досягають граничного стану, що забезпечує формування регламентованих параметрів якості виробу згідно вимог конструкторсько-технологічної документації; 2 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 005 металорізальний верстат загалом або його елементи зокрема знаходяться у граничному стані; 3 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 005 пристрій на металорізальному верстаті загалом або його елементи зокрема знаходяться у граничному стані; 4 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 005 металорізальний(і) інструмент(и) або його (їхні) елементи знаходяться у граничному стані. На рис. 5.2 позначено λ_{MPB_005} , λ_{MPr_005} , λ_{MPI_005} – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстату, пристрою на металорізальному верстаті та металорізального інструменту або їхні елементів на технологічній операції 005 при обробленні заготовки виробу.

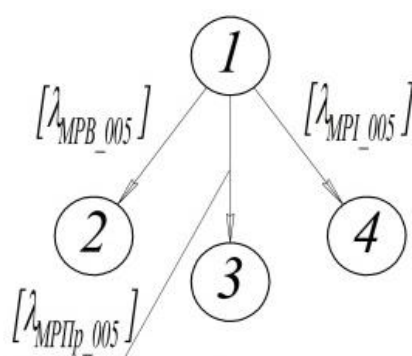


Рис. 5.2. Технологічний граф надійності для операції 005 Горизонтально-фрезерна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Відповідно до рис. 5.2 $P_1(t)$ – ймовірність перебування технічної системи у стані 1, що характеризує забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови недосягнення

граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом та їх елементами зокрема; $P_2(t)$ – ймовірність перебування технічної системи у стані 2, що характеризує незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану металорізальним верстатом та (або) його елементами зокрема; $P_3(t)$ – ймовірність перебування технічної системи у стані 3, що характеризує незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану пристроєм на металорізальному верстаті та (або) його елементами зокрема; $P_4(t)$ – ймовірність перебування технічної системи у стані 4, що характеризує незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану металорізальним(ими) інструментом(ами) та (або) його (їх) елементами зокрема.

Технологічний граф надійності для аналізу процесу формування параметрів надійності із врахуванням впливу технологічної системи: ВПД(З) при забезпеченні регламентованих показників якості на операції 010 Радіально-свердлильна оброблення корпусу редуктора К 02.106 приведено на рис. 5.3.

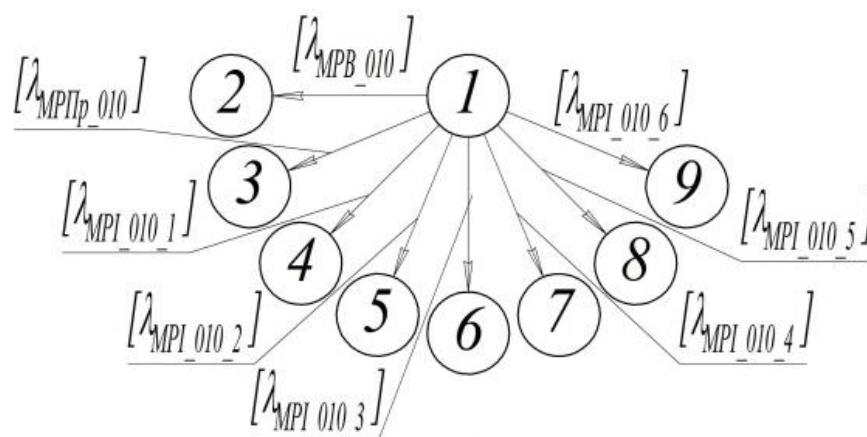


Рис. 5.3. Технологічний граф надійності для операції 010 Радіально-свердлильна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Вершини технологічного графа надійності (рис. 5.3) описують можливість перебування технічної системи у дев'яти можливих станах: 1 – елементи технологічної системи ВПД(З): металорізальний верстат (МРВ), пристрій на металорізальному верстаті (МПр), металорізальний інструмент (МРІ) на технологічній операції 010 не досягають граничного стану, що забезпечує формування регламентованих параметрів якості виробу згідно вимог конструкторсько-технологічної документації; 2 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 010 металорізальний верстат загалом або його елементи зокрема знаходяться у граничному стані; 3 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 010 пристрій на металорізальному верстаті загалом або його елементи зокрема знаходиться у граничному стані; 4 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 010 металорізальний інструмент № 1 (за порядком виконання технологічного процесу) або його елементи знаходяться у граничному стані; 5 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 010 металорізальний інструмент № 2 або його елементи знаходяться у граничному стані, 6 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 010 металорізальний інструмент № 3 або його елементи знаходяться у граничному стані; 7 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 010 металорізальний інструмент № 4 або його елементи знаходяться у граничному стані; 8 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 010 металорізальний інструмент № 5 або його елементи знаходяться у граничному стані; 9 – у технологічній системі ВПД(З) при обробленні заготовки виробу на технологічній операції 010 металорізальний інструмент № 6 або його елементи знаходяться у граничному стані.

Металорізальний верстат і пристрій на металорізальному верстаті застосовуються протягом усього основного часу оброблення на даній технологічній операції: $[\lambda_{MPB_010}; \lambda_{MPI_010}] \in [0; t]$.

На противагу металорізальні інструменти на даній операції працюють лише визначені часи: $\lambda_{MPI_010_1} \in [0; t_1]$; $\lambda_{MPI_010_2} \in [t_1; t_2]$; $\lambda_{MPI_010_3} \in [t_2; t_3]$; $\lambda_{MPI_010_4} \in [t_3; t_4]$; $\lambda_{MPI_010_5} \in [t_4; t_5]$; $\lambda_{MPI_010_6} \in [t_5; t_6]$; причому $t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = t$.

$t \in [0; t]$; $t'[\lambda_{MPI_010_1}] \in [0; t_1]$; $t''[\lambda_{MPI_010_2}] \in [t_1; t_2]$; $t'''[\lambda_{MPI_010_3}] \in [t_2; t_3]$; $t''''[\lambda_{MPI_010_4}] \in [t_3; t_4]$; $t''''''[\lambda_{MPI_010_5}] \in [t_4; t_5]$; $t''''''''[\lambda_{MPI_010_6}] \in [t_5; t_6]$.

Оскільки експоненціальний закон розподілу випадкових величин не має «пам'яті» на відміну від інших законів розподілу, то не потрібно розбивати загальний технологічний граф надійності технічної системи, що описується ланцюгами Маркова, на множину технологічних графів для опису складових підсистем, що характеризують операцію 010 виготовлення корпусу редуктора.

Технологічні графи надійності (та системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена) для інших операцій механічного оброблення корпусу редуктора приведено у дод. 3.

5.4. Дослідження інтенсивності відмов для елементів технологічної системи «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)»

Інтенсивність відмов є важливим показником безвідмовності неремонтованих і невідновлюваних об'єктів.

Згідно ДСТУ 2860-94 інтенсивність відмов – це умовна густина ймовірності виникнення відмови об'єкта, яка визначається за умови, що до розглядуваного моменту часу відмова не виникне. У загальному випадку

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (5.23)$$

де $f(t)$ – густина розподілу часу безвідмовної роботи; $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи об'єкта системи, підсистеми тощо.

5.4.1. Визначення інтенсивності відмов для основного технологічного обладнання (металорізальних верстатів) у системі «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» при виготовленні машинобудівних виробів

У процесі експлуатації МРВ приймається, що система технічного обслуговування та ремонту верстату реалізовується чітко відповідно до його ремонтного циклу. Це мінімізує вплив зношування вузлів і деталей МРВ на забезпечення регламентованих параметрів якості виробів.

У зв'язку з цим для проведення досліджень прийнято експоненціальний закон розподілу параметрів металорізальних верстатів при обробленні деталей машин, зокрема і корпуса редуктора К 02.106.

Середній термін служби металорізального верстату складає 12 років [263x29ʼ]. Відновлення втрачених технічних параметрів основного технологічного обладнання здійснюється відповідно до його ремонтного циклу, який для легких та середніх (металорізальних верстатів має таку структура: К-О-П-О-П-О-С-О-П-О-П-О-С-О-П-О-П-О-К, де К – капітальний ремонт; С – середній ремонт (2); П – поточний ремонт (6); О – огляд (9) [263].

Тривалість ремонтного циклу безпосередньо пов'язана із ступенем точності машини, умовами її роботи, режимами різання при механічному обробленні заготовок, типом виробництва і термінами служби швидкозношуваних деталей машин. Середня тривалість ремонтного циклу дорівнює 30000 робочих годин. При цьому ремонтний цикл для двозмінного режиму роботи становить приблизно 90 місяців, міжремонтний період – 9 місяців, міжоглядовий період – 5 місяців [263].

Оскільки міжремонтний період у ремонтному циклі металорізального верстата встановлюється відповідно до необхідності відновлення втрачених під час експлуатації його технічних характеристик, то інтенсивність відмов МРВ при експоненціальному законі надійності:

$$\lambda_{MPB} = \frac{1}{T_{МП_MPB}}. \quad (5.24)$$

де $T_{МП_МРВ}$ – середній міжремонтний період у ремонтному циклі МРВ, хв.

$$T_{МП_МРВ} = \frac{F_{дійсн.} \cdot [T_{МП_МРВ}]}{12} \cdot 60, \quad (5.25)$$

де $[T_{МП_МРВ}]$ – середній міжремонтний період у ремонтному циклі МРВ у місяцях; $F_{дійсн.}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год; для двозмінного режиму роботи $F_{дійсн.} = 4055$ год [193].

$$T_{МП_МРВ} = \frac{4055 \cdot 9}{12} \cdot 60 = 182475 \text{ хв.}$$

Приймаємо $T_{МП_МРВ_005} = T_{МП_МРВ_010} = T_{МП_МРВ_015} = T_{МП_МРВ_020} =$
 $= T_{МП_МРВ_025} = T_{МП_МРВ_030} = T_{МП_МРВ_035} = T_{МП_МРВ_040} = T_{МП_МРВ_045} = T_{МП_МРВ_050} =$
 182475 хв.

$$\lambda_{МРВ} = \frac{1}{182475} = 5,480203 \cdot 10^{-6} \text{ 1/хв.}$$

Отже, $\lambda_{МРВ_005} = \lambda_{МРВ_010} = \lambda_{МРВ_015} = \lambda_{МРВ_020} = \lambda_{МРВ_025} = \lambda_{МРВ_030} = \lambda_{МРВ_035} =$
 $\lambda_{МРВ_040} = \lambda_{МРВ_045} = \lambda_{МРВ_050} = 5,480203 \cdot 10^{-6} \text{ 1/хв.}$

5.4.2. Розрахунок інтенсивності відмов пристрою на металорізальному верстаті у системі «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» під час виготовлення машинобудівних виробів

У процесі експлуатації МРВ приймаємо, що система технічного обслуговування та ремонту технологічного оснащення реалізовується чітко відповідно до його ремонтного циклу, що мінімізує вплив зношування вузлів і деталей верстатних пристроїв на забезпечення регламентованих параметрів якості машинобудівних виробів.

У зв'язку з цим приймаємо експоненціальний закон розподілу параметрів пристроїв на металорізальних верстатах при обробленні корпусу редуктора.

При експоненціальному законі надійності інтенсивність відмов верстатних пристроїв визначають за формулою:

$$\lambda_{МПр} = \frac{1}{T_{МПр}}. \quad (5.26)$$

де $T_{Пр}$ – встановлене безвідмовне напрацювання на відмову верстатного пристрою; для механізованих верстатних пристроїв, $T_{Пр} = 1500$ год [334].

Тоді:

$$\lambda_{МПр} = \frac{1}{1500 \cdot 60} = 1,111111 \cdot 10^{-5} \text{ 1/хв.}$$

Отже, $\lambda_{МПр005} = \lambda_{МПр010} = \lambda_{МПр015} = \lambda_{МПр020} = \lambda_{МПр025} = \lambda_{МПр030} = \lambda_{МПр035} = \lambda_{МПр040} = \lambda_{МПр045} = \lambda_{МПр050} = 1,111111 \cdot 10^{-5} \text{ 1/хв.}$

5.4.3. Визначення інтенсивності відмов металорізального інструменту у системі «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» під час виготовлення машинобудівних виробів

Найслабшим елементом в технологічній системі ВПД(3) з позиції надійності є металорізальний інструмент [144, 215, 248].

Серед законів розподілу випадкових величин для оцінки параметрів надійності металорізального інструменту використовується експоненціальний розподіл, що обґрунтовується такими критеріями [215]:

1) при експоненціальному розподілі, порівняно з іншими статистичними законами, ймовірність безвідмовної роботи отримується завжди заниженою, що визначає жорсткіші вимоги до параметрів надійності МРІ;

2) при аналізі показників надійності для визначеного технологічного переходу (операції) при обробленні даним інструментом фактична тривалість його роботи значно менша стійкості МРІ, що дозволяє не враховувати його знос, і інтенсивність відмов на малому проміжку часу допустимо прийняти постійною величиною.

Встановлено [144], що в процесі експлуатації металорізального інструменту при механічному обробленні заготовок виробів відбувається відбракування гірших за якістю зразків МРІ. Тому інтенсивність відмов для партії МРІ залишається практично незмінною.

Інтенсивність відмов у розрахунках показників надійності елементів технологічної системи ВПД(3) для експоненціального закону прийнята рівною

інтенсивності руйнування металорізального інструменту λ_{MPI_0} , що розраховують за формулою [215]:

$$\lambda_{MPI} = \lambda_{MPI_0} = \lambda_{MPI_баз.} \cdot k_{відм.}, \quad (5.27)$$

де $\lambda_{MPI_баз.}$ – базова інтенсивність відмов інструменту, при експоненціальному законі надійності, $1/хв$, $k_{відм.}$ – безрозмірний поправний коефіцієнт, що враховує частку раптових відмов для даного виду інструменту.

Тому при експоненціальному законі надійності базову інтенсивність відмов інструменту визначають за формулою [215]:

$$\lambda_{MPI_баз.} = \frac{1}{T}. \quad (5.28)$$

де T – стійкість MPI, хв.

Підставивши (5.28) у (5.27), отримаємо:

$$\lambda_{MPI} = \lambda_{MPI_0} = \frac{k_{відм.}}{T}. \quad (5.29)$$

Розрахунок інтенсивності відмов MPI при обробленні корпусу редуктора приведено у табл. 5.1. Стійкість фрез, свердел, розверток, зенківок, цековок, мітчиків, різців встановлено згідно рекомендацій [144, 147, 215]. При відсутності даних для визначення $k_{відм.}$ відповідно до [274] для оброблення сірого чавуну приймаємо $k_{відм.}=1$.

5.5. Дослідження математичних моделей впливу елементів системи «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» на забезпечення регламентованих параметрів якості виробів

5.5.1. Математичне моделювання забезпечення параметрів якості машинобудівного виробу на операціях технологічного процесу його виготовлення

На підставі математичного моделювання технологічного процесу під час реалізації принципу ФОП ТП визначають показники надійності елементів системи ВПД(З) на стадії розроблення виробу у його життєвому циклі.

Таблиця 5.1

Розрахунок інтенсивності відмов інструментів в процесі виготовленні корпуса
редуктора К 02.106

| № операції | № переходу | Назва та позначення інструменту | Поправний коефіцієнт $k_{відм.}$ | Стійкість, хв | Інтенсивність відмов λ , 1/хв |
|------------|------------|--|----------------------------------|---------------|---------------------------------------|
| 005 | 1 | Фреза торцева \varnothing 250 мм 2214-0161 BK8 | 0,75 | 300 | 0,0025 |
| 010 | 1 | Свердло 2301-0057 | 1,00 | 45 | 0,02222 |
| | 2 | Свердло 2301-0056 | 1,00 | 45 | 0,02222 |
| | 3 | Свердло 2300-6173 | 1,00 | 15 | 0,06667 |
| | 4 | Розвертка \varnothing 17H9 | 1,00 | 45 | 0,02222 |
| | 5 | Свердло 2300-0203 | 1,00 | 25 | 0,04000 |
| | 6 | Мітчик 2621-1155 | 1,00 | 90 | 0,01111 |
| 015 | 1 | Фреза торцева торцева \varnothing 250 мм 2214-0159 BK8 | 0,75 | 250 | 0,003 |
| 020 | 1 | Фреза торцева \varnothing 160 мм 2214-0157 BK8 | 0,75 | 250 | 0,003 |
| 025 | 1 | Різець 2142-4103 | 0,81 | 30 | 0,027 |
| | 2 | Різець 2142-4103 | 0,81 | 30 | 0,027 |
| | 3 | Різець 2142-4103 | 0,81 | 30 | 0,027 |
| | 4 | Різець 2142-4103 | 0,81 | 30 | 0,027 |
| | 5 | Розвертка \varnothing 80H7 | 1,00 | 30 | 0,03333 |
| 030 | 1 | Різець 2142-4103 | 0,81 | 30 | 0,027 |
| | 2 | Різець 2142-4103 | 0,81 | 30 | 0,027 |
| 035 | 1 | Свердло 2300-0186 | 1,00 | 25 | 0,04000 |
| | 2 | Свердло 2301-0039 | 1,00 | 25 | 0,04000 |
| | 3 | Мітчик 2621-2531 | 1,00 | 90 | 0,01111 |
| 040 | 1 | Свердло 2300-0186 | 1,00 | 25 | 0,04000 |
| | 2 | Свердло 2301-0039 | 1,00 | 25 | 0,04000 |
| | 3 | Мітчик 2621-2531 | 1,00 | 90 | 0,01111 |
| 045 | 1 | Свердло 2300-0200 | 1,00 | 25 | 0,0400 |
| | 2 | Свердло 2301-0046 | 1,00 | 45 | 0,02222 |
| | 3 | Мітчик 2621-2595 | 1,00 | 90 | 0,01111 |
| 050 | 1 | Свердло 2301-0030 | 1,00 | 45 | 0,02222 |
| | 2 | Цековка 20×10.2 | 1,00 | 30 | 0,03333 |
| | 3 | Зенківка Р-1667-10 | 1,00 | 30 | 0,03333 |
| | 4 | Мітчик 2620-1513 | 1,00 | 90 | 0,01111 |

Для операції 005 ТП виготовлення корпуса редуктора К 02.106 розроблено систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності (рис. 5.2):

$$\begin{aligned}\frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_005} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_005} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_005} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_005} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_005} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_005} \cdot P_1(t), \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) &= 1, \quad t \in [0; t]\end{aligned} \quad (5.30)$$

Розв'язки системи диференціальних рівнянь (5.30) мають вигляд:

$$\begin{aligned}P_1(t) &= e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t} + C_1, \\ P_2(t) &= \int \lambda_{MPB_005} \cdot P_1(t) = \lambda_{MPB_005} \int \left(e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t} + C_1 \right) dt = \\ &= \frac{\lambda_{MPB_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MPB_005} \cdot C_1 \cdot t + C_2.\end{aligned}$$

Аналогічно до визначення $P_2(t)$ встановлено $P_3(t)$ і $P_4(t)$.

$$\begin{aligned}P_3(t) &= \int \lambda_{MIP_005} \cdot P_1(t) = \lambda_{MIP_005} \int \left(e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t} + C_1 \right) dt = \\ &= \frac{\lambda_{MIP_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MIP_005} \cdot C_1 \cdot t + C_3; \\ P_4(t) &= \int \lambda_{MPI_005} \cdot P_1(t) = \lambda_{MPI_005} \int \left(e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t} + C_1 \right) dt = \\ &= \frac{\lambda_{MPI_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MPI_005} \cdot C_1 \cdot t + C_4;\end{aligned}$$

Тут C_1, C_2, C_3, C_4 – довільні константи, значення яких визначають з крайових умов.

Відповідно до технологічного графа надійності (рис. 5.3) сформовано крайові умови: $P_1(t=0) = 1$; $P_2(t=0) = 0$; $P_3(t=0) = 0$; $P_4(t=0) = 0$, що забезпечують виконання умови (п'ятого рівняння) системи (5.30).

Константи C_1, C_2, C_3, C_4 знайдено у символічному вигляді.

$$1. P_1(t) = e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t} + C_1,$$

При $P_1(t=0) = 1$ отримано:

$$1 = e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005}) \cdot 0} + C_1,$$

$$C_1 = 0.$$

$$P_2(t) = \int \lambda_{MPB_005} \cdot P_1(t) = \lambda_{MPB_005} \int \left(e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t} + C_1 \right) dt =$$

$$2. = \frac{\lambda_{MPB_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MPB_005} \cdot C_1 \cdot t + C_2.$$

При $P_2(t=0) = 0$ отримано:

$$0 = \frac{\lambda_{MPB_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005}) \cdot 0}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MPB_005} \cdot 0 \cdot 0 + C_2;$$

$$C_2 = \frac{\lambda_{MPB_005} \cdot I}{(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})};$$

$$P_3(t) = \int \lambda_{MIP_005} \cdot P_1(t) = \lambda_{MIP_005} \int \left(e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t} + C_1 \right) dt =$$

$$3. = \frac{\lambda_{MIP_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MIP_005} \cdot C_1 \cdot t + C_3;$$

При $P_3(t=0) = 0$ отримано:

$$0 = \frac{\lambda_{MIP_005} \cdot \lambda_{MPB_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005}) \cdot 0}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MIP_005} \cdot 0 \cdot 0 + C_3;$$

$$C_3 = \frac{\lambda_{MIP_005} \cdot I}{(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})}$$

$$P_4(t) = \int \lambda_{MPI_005} \cdot P_1(t) = \lambda_{MPI_005} \int \left(e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t} + C_1 \right) dt =$$

$$4. = \frac{\lambda_{MPI_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MPI_005} \cdot C_1 \cdot t + C_4;$$

При $P_4(t=0) = 0$ отримано:

$$0 = \frac{\lambda_{MPI_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005}) \cdot 0}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + \lambda_{MPI_005} \cdot 0 \cdot 0 + C_4;$$

$$C_4 = \frac{\lambda_{MPI_005} \cdot I}{(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})};$$

Після підстановки λ_{MPB_005} (п. 5.4.1), λ_{MIP_005} (п. 5.4.2), λ_{MPI_005} (табл. 5.1), знайдено значення C_2, C_3, C_4 .

$$C_2 = \frac{5,480203 \cdot 10^{-6}}{(5,480203 \cdot 10^{-6} + 1,111111 \cdot 10^{-5} + 0,0025)} = 2,177629 \cdot 10^{-3};$$

$$C_3 = \frac{1,111111 \cdot 10^{-5}}{(5,480203 \cdot 10^{-6} + 1,111111 \cdot 10^{-5} + 0,0025)} = 4,415143 \cdot 10^{-3};$$

$$C_4 = \frac{0,0025}{(1,5844 \cdot 10^{-7} + 1,111111 \cdot 10^{-5} + 0,0025)} = 0,993407.$$

При виготовленні корпусу редуктора К 02.106 на технологічній операції 005 Горизонтально-фрезерна формуються показники надійності елементів системи ВПД(З):

- ймовірність забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним(ними) інструментом(тами) загалом та їх елементами зокрема

$$P_1(t) = e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t},$$

- ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану металорізальним верстатом та (або) його елементами зокрема

$$F_2(t) = \frac{\lambda_{MPB_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{MIP_005} + \lambda_{MPI_005})} + 2,177629 \cdot 10^{-3};$$

- ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану пристроєм на металорізальному верстаті та (або) його елементами зокрема

$$F_3(t) = \frac{\lambda_{МПр_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{МПр_005} + \lambda_{MPI_005}) \cdot t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{МПр_005} + \lambda_{MPI_005})} + 4,415143 \cdot 10^{-3};$$

- ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану металорізальним інструментом та (або) його елементами зокрема

$$F_4(t) = \frac{\lambda_{MPI_005} \cdot e^{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{МПр_005} + \lambda_{MPI_005}) \cdot t}}{-(\lambda_{MPB_005} + \lambda_{МПр_005} + \lambda_{MPI_005})} + 0,993407.$$

Значення показників надійності системи ВПД(3) на операції 005 після підстановки λ_{MPB_005} (п. 5.5.1), $\lambda_{МПр_005}$ (п. 5.5.2), λ_{MPI_005} (табл. 5.1) і значення основного часу на оброблення виробу на операції 005 Горизонтально-фрезерна (дод. Ж) приведено у табл. 5.2.

Для операції 010 Радіально-свердлильна ТП виготовлення корпусу редуктора розроблено систему диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності (рис. 5.3):

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_010} \cdot P_1(t) - \lambda_{МПр_010} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_010_1} \cdot P_1(t) - \\ &\lambda_{MPI_010_2} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_010_3} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_010_4} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_010_5} \cdot P_1(t) - \\ &\lambda_{MPI_010_1} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_010} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{МПр_010} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_1} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_2} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_3} \cdot P_1(t), \end{aligned} \tag{5.31}$$

$$\begin{aligned}\frac{dP_7(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_4} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_8(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_5} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_9(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_6} \cdot P_1(t), \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) + P_9(t) &= 1,\end{aligned}$$

де λ_{MPB_010} , λ_{MIP_010} , $\lambda_{MPI_010_1}$, $\lambda_{MPI_010_2}$, $\lambda_{MPI_010_3}$, $\lambda_{MPI_010_4}$, $\lambda_{MPI_010_5}$, $\lambda_{MPI_010_6}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізальних інструментів № 1-№ 6 (за порядком виконання технологічного процесу) на операції 010 Радіально-свердлильна ТП виготовлення корпусу редуктора.

Крайові умови для системи (5.31):

$$\begin{aligned}P_1(t=0) &= 1; P_2(t=0) = 0; P_3(t=0) = 0; P_4(t=0) = 0; P_5(t=0) = 0; P_6(t=0) = 0; \\ P_7(t=0) &= 0; P_8(t=0) = 0; P_9(t=0) = 0.\end{aligned}$$

забезпечують виконання умови (десятого рівняння) системи (5.31).

Розв'язок основного дифрівняння має вигляд:

$$\begin{aligned}P_1(t) &= e^{-(\lambda_{MPB_010} + \lambda_{MIP_010})t} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_1} \cdot t'} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_2} \cdot t''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_015_3} \cdot t'''} \times \\ &\times e^{-\lambda_{MPI_010_4} \cdot t''''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_5} \cdot t'''''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_6} \cdot t''''''} + C_1,\end{aligned}$$

При $P_1(t=0) = 1$ $C_1 = 0$:

$$\begin{aligned}P_1(t) &= e^{-(\lambda_{MPB_010} + \lambda_{MIP_010})t} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_1} \cdot t'} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_2} \cdot t''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_015_3} \cdot t'''} \times \\ &\times e^{-\lambda_{MPI_010_4} \cdot t''''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_5} \cdot t'''''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_6} \cdot t''''''},\end{aligned}$$

Після підстановки значень отримано:

$$\begin{aligned}P_1(t) &= e^{-(5,48020310^{-6} + 1,11111110^{-5})t} \cdot e^{-0,02222t'} \cdot e^{-0,02222t''} \cdot e^{-0,06667t'''} \cdot e^{-0,02222t''''} \times \\ &\times e^{-0,04t'''''} \cdot e^{-0,01111t''''''}\end{aligned}$$

$t \in [0; t]$; $t' \in [0; t_1]$; $t'' \in [t_1; t_2]$; $t''' \in [t_2; t_3]$; $t'''' \in [t_3; t_4]$; $t'''''' \in [t_4; t_5]$; $t'''''''' \in [t_5; t_6]$.

Таблиця 5.2

Показники надійності елементів системи ВПД при обробленні заготовки виробу на операції 005 механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

| № з/п | Показник надійності елементів системи ВПД(З) | Позначення на графі / фізичний зміст | Числове значення |
|-------|---|--------------------------------------|----------------------|
| 1. | Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним інструментом загалом та їх елементами зокрема | $P_1(t) / P_1(t)$ | 0,9963 |
| 2. | Ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану металорізальним верстатом та (або) його елементами зокрема | $P_2(t) / F_2(t)$ | $8,09 \cdot 10^{-6}$ |
| 3. | Ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану пристроєм на металорізальному верстаті та (або) його елементами зокрема | $P_3(t) / F_3(t)$ | $1,64 \cdot 10^{-5}$ |
| 4. | Ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції 005 за умови досягнення граничного стану металорізальним інструментом та (або) його елементами зокрема | $P_4(t) / F_4(t)$ | $3,69 \cdot 10^{-3}$ |

Згідно дод. Ж для операції 010 встановлено граничні значення для інтервалу часу: $t \in [0; 4,71]$; $t' \in [0; 0,6]$; $t'' \in [0,6; 1,2]$; $t''' \in [1,2; 3,1]$; $t'''' \in [3,1; 3,45]$; $t''''' \in [3,45; 3,65]$; $t'''''' \in [3,65; 4,71]$.

Найголовнішим результатом для технолога, що отримують при розв'язку системи диференціальних рівнянь, є ймовірність забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції за умови

недосягнення граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним інструментом загалом та їх елементами зокрема.

Тому результати розрахунків показників надійності в процесі аналізу формування параметрів виробу на визначеному технологічному переході в межах технологічної операції, на визначеній операції технологічного процесу обмежено визначенням $P_i(t)$ для системи (5.31).

Структурну схему забезпечення параметрів якості виробів із врахуванням технологічного успадковування їх властивостей для принципів ООП ТП і ФОП ТП приведено на рис. 5.4.

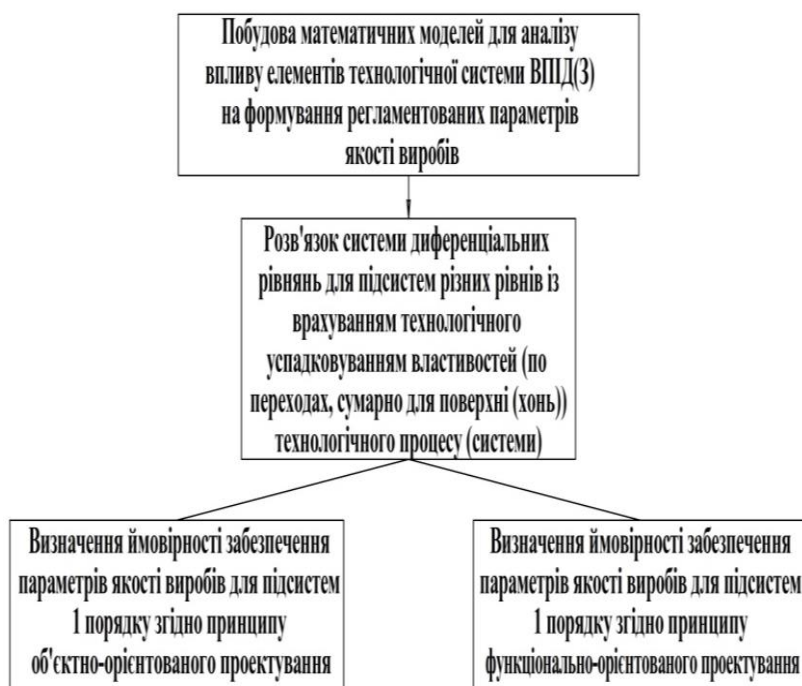


Рис. 5.4. Структурна схема забезпечення параметрів якості виробів із врахуванням технологічного успадковування їх властивостей для принципів об'єктно- та функціонально-орієнтованого проектування ТП

Граничні значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості корпуса редуктора при перебуванні у працездатному стані МРВ, пристрою на МРВ та МРІ для операцій технологічного процесу виготовлення корпуса редуктора по переходах, поопераційно для принципів ООП і ФОП ТП приведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора по технологічних переходах і операціях

| № операції | Назва операції та зміст переходів | Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості виробу | | | |
|------------|--|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | по переходах | сумарно для поверхні (сукупності поверхонь) | поопераційно згідно принципу ООП ТП | поопераційно згідно принципу ФОП ТП |
| 005 | Горизонтально-фрезерна Фрезерувати базову площину 1. | 0,9963 | 0,9963 | 0,9963 | 0,9963 |
| 010 | Радіально-свердлильна | | | 0,8343 | 0,9660 |
| | 1. Свердлити послідовно два отв. напрохід в розмір $\varnothing 16^{+0.4}$ мм. | 0,9867 | 0,9660 | | |
| | 2. Свердлити послідовно два отв. напрохід в розмір $\varnothing 16,5^{+0.2}$ мм. | 0,9867 | | | |
| | 4. Розвернути послідовно два отв. напрохід в розмір $\varnothing 17H9$ мм. | 0,9922 | | | |
| | 3. Свердлити послідовно шість отв. вирімуючи $\varnothing 5^{+0.1}$ мм. | 0,881 | 0,8637 | | |
| | 5. Зенкувати послідовно 6 фасок $1 \times 45^\circ$ в отворах. | 0,992 | | | |
| | 6. Нарізати послідовно різь М6-6H в 6 отворах. | 0,9883 | | | |
| 015 | Горизонтально-фрезерна Фрезерувати бічну площину корпусу. | 0,996 | 0,996 | 0,996 | 0,996 |
| 020 | Горизонтально-фрезерна Фрезерувати протилежну бічну площину корпусу. | 0,9967 | 0,9967 | 0,9967 | 0,9967 |
| 025 | Токарно-гвинторізна | | | 0,7862 | 0,8516 |
| | 1. Розточити отв. напрохід в $\varnothing 145^{+0.15}$ мм. | 0,9282 | 0,9232 | | |
| | 2. Розточити фаску $2 \times 45^\circ$. | 0,9946 | | | |
| | 3. Розточити отв. попередньо напрохід в розмір $\varnothing 79.7^{+0.1}$ мм. | 0,9051 | 0,8516 | | |
| | 4. Розточити фаску $2 \times 45^\circ$. | 0,9957 | | | |
| | 5. Розвернути отв. кінцево напрохід в розмір $\varnothing 80H7$ мм. | 0,9449 | | | |

Продовження табл. 5.3

| № операції | Назва операції та зміст переходів | Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості виробу | | | |
|------------|---|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | по переходах | сумарно для поверхні (сукупності поверхонь) | поопераційно згідно принципу ООП ТП | поопераційно згідно принципу ФОП ТП |
| 030 | Токарно-гвинторізна | | | 0,9142 | 0,9142 |
| | 1. Розточити отв. напрохід в $\varnothing 110^{+0.14}$ мм. | 0,9182 | 0,9142 | | |
| | 2. Розточити фаску $2 \times 45^\circ$. | 0,9957 | | | |
| 035 | Радіально-свердлильна | | | 0,8859 | 0,8859 |
| | 1. Свердлити послідовно вісім отв. в розмір $\varnothing 6.7^{+0.2}$ мм. | 0,9012 | 0,8859 | | |
| | 2. Зенкувати послідовно фаски $1.6 \times 45^\circ$ у 8 отворах. | 0,992 | | | |
| | 3. Нарізати послідовно різь М8-6Н в 8 отворах. | 0,9909 | | | |
| 040 | Радіально-свердлильна | | | 0,9412 | 0,9412 |
| | 1. Свердлити послідовно чотири отв. в розмір $\varnothing 8.5^{+0.2}$ мм. | 0,9493 | 0,9412 | | |
| | 2. Зенкувати послідовно фаски $1.6 \times 45^\circ$ у 8 отворах. | 0,996 | | | |
| | 3. Нарізати послідовно різь М8-6Н в 8 отворах. | 0,9955 | | | |
| 045 | Радіально-свердлильна | | | 0,9294 | 0,9294 |
| | 1. Свердлити послідовно чотири отв. в розмір $\varnothing 8.5^{+0.2}$ мм. | 0,9361 | 0,9294 | | |
| | 2. Зенкувати послідовно фаски $1.6 \times 45^\circ$ у 8 отворах. | 0,9978 | | | |
| | 3. Нарізати послідовно різь М8-6Н в 8 отворах. | 0,9950 | | | |

Продовження табл. 5.3

| № операції | Назва операції та зміст переходів | Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості виробу | | | |
|------------|---|---|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | по переходах | сумарно для поверхні (сукупності поверхонь) | поопераційно згідно принципу ООП ТП | поопераційно згідно принципу ФОП ТП |
| 050 | Радіально-свердлильна | | | 0,964 | 0,9879 |
| | 1. Свердлити отв. напрохід в розмір $\varnothing 10.2^{+0.2}$ мм. | 0,9949 | 0,9879 | | |
| | 2. Цекувати отв. в розмір $\varnothing 20^{+0.4}$ мм. | 0,996 | | | |
| | 3. Зенкувати фаску $1.6 \times 45^\circ$ в отворі. | 0,998 | | | |
| | 4. Нарізати різь М12-6Н в отворі. | 0,9989 | 0,9879 | | |
| | 5. Свердлити отв. напрохід в розмір $\varnothing 10.2^{+0.2}$ мм. | 0,9949 | | | |
| | 6. Цекувати отв. в розмір $\varnothing 20^{+0.4}$ мм. | 0,996 | | | |
| | 7. Зенкувати фаску $1.6 \times 45^\circ$ в отворі. | 0,998 | | | |
| | 8. Нарізати різь М12-6Н в отворі. | 0,9989 | 0,9879 | | |
| | 9. Свердлити отв. напрохід в розмір $\varnothing 10.2^{+0.2}$ мм. | 0,9949 | | | |
| | 10. Цекувати отв. в розмір $\varnothing 20^{+0.4}$ мм. | 0,996 | | | |
| | 11. Зенкувати фаску $1.6 \times 45^\circ$ в отворі. | 0,998 | | | |
| | 12. Нарізати різь М12-6Н. | 0,9989 | | | |

Під час розв'язування системи диференціальних рівнянь розраховуються ймовірності забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при його обробленні по переходах (підсистемах 2 порядку) і по технологічних операціях (підсистемах 1 порядку) за умови недосягнення граничних станів елементів технологічного середовища при розробленні ТП (технічна система) виготовлення корпусу редуктора К. 02.106. Розраховані ймовірності групуються за методами оброблення поверхонь у межах визначеної операції та визначаються ймовірності забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу за умови недосягнення граничних станів елементів технологічного середовища сумарно для поверхні (сукупності поверхонь). Під сукупністю поверхонь інтерпретується оброблення фасок для внутрішніх і зовнішніх циліндричних поверхонь, різевих елементів виробів тощо. Визначення ймовірностей забезпечення регламентованих параметрів якості виробу сумарно для технологічних операцій для принципів ООП і ФОП ТП має свої особливості. Для принципу ООП ТП ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості виробу за умови недосягнення граничних станів елементів технологічного середовища для визначеної технологічної операції розраховується як ймовірність послідовності незалежних подій при перемноженні ймовірностей по технологічних переходах. На противагу для принципу ФОП ТП ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості виробу за умови недосягнення граничних станів елементів технологічного середовища для визначеної технологічної операції визначається як ймовірність забезпечення параметрів якості виконавчої, базової поверхні із високими вимогами до точності та якості її оброблення у межах технологічної операції. При обробленні однотипних поверхонь із однаковими технологічними маршрутами їх оброблення ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості виробу для технологічної операції визначається як ймовірність послідовності незалежних подій для однієї поверхні (сукупності поверхонь). Для операції із одним технологічним переходом значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості виробу сумарно для технологічних операцій згідно принципів ООП і ФОП ТП буде однаковою (рис. 5.5, 5.6).

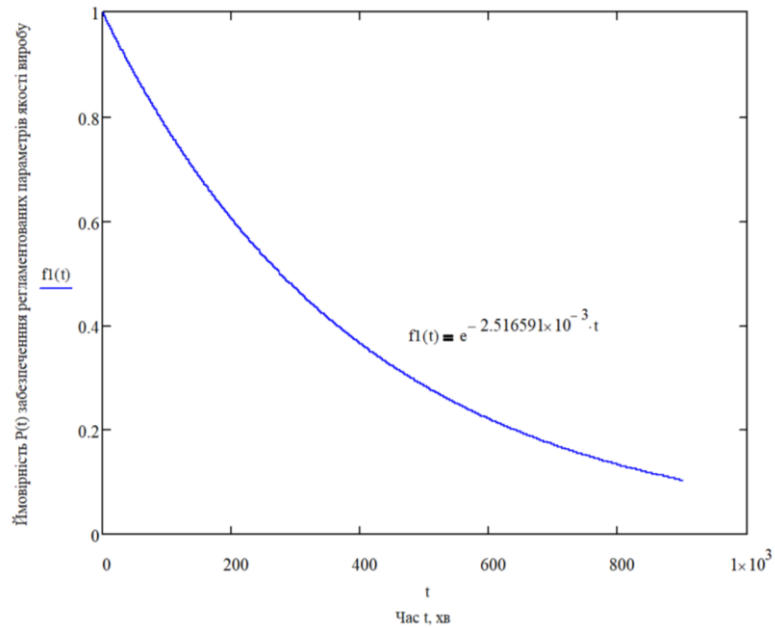


Рис. 5.5. Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на операції 005 Горизонтально-фрезерна оброблення корпуса редуктора за умови недосягнення граничних станів елементів технологічного середовища

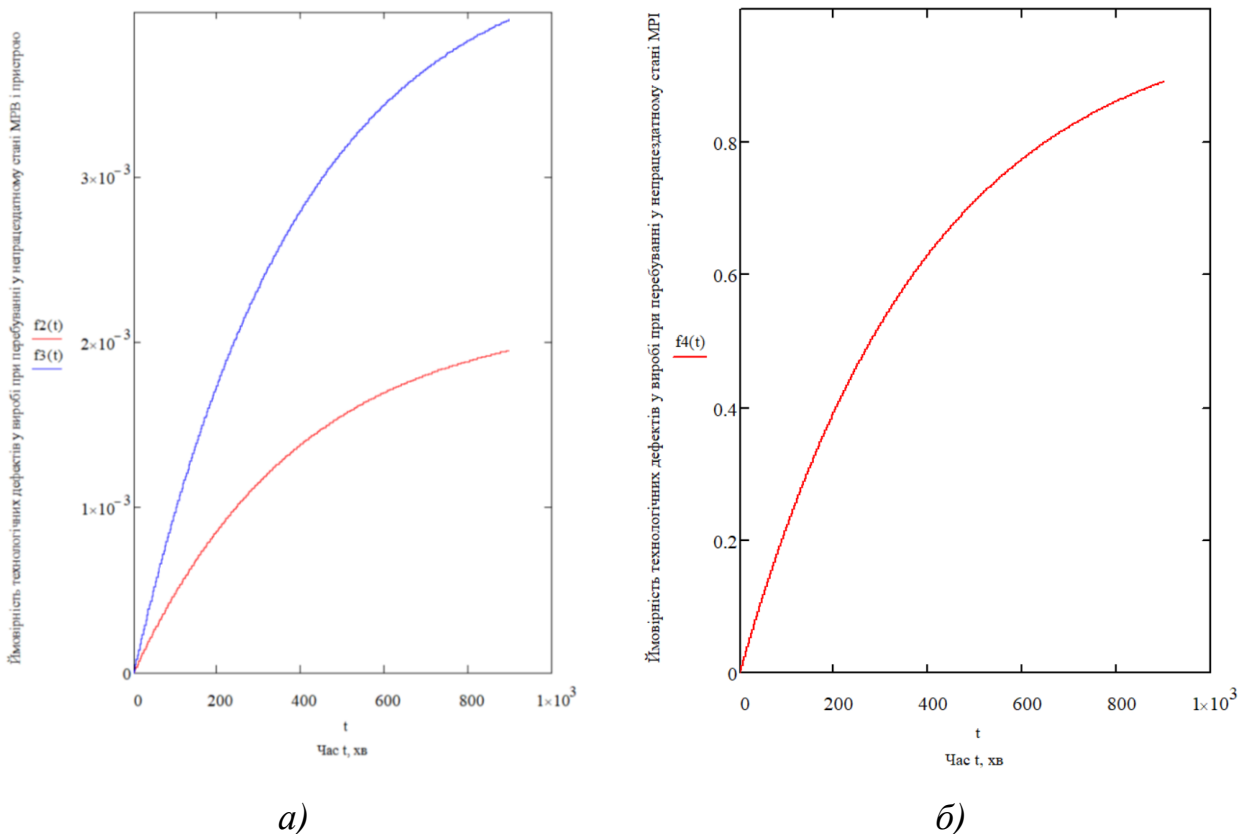


Рис. 5.6. Ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості на операції 005 Горизонтально-фрезерна механічного оброблення корпуса редуктора при досягненні граничного стану МРВ і пристрою. а) і МРІ б)

На підставі результатів математичного моделювання (табл. 5.3) визначено ймовірність забезпечення вихідних параметрів якості виробів для принципів ООП і ФОП ТП виготовлення виробів (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

Ймовірність забезпечення вихідних параметрів якості корпусу редуктора для принципів ООП і ФОП ТП виготовлення виробів

| № операції | Назва операції | Ймовірність забезпечення вихідних параметрів якості виробу | | | |
|------------|------------------------|--|---|---|---|
| | | для принципу ООП ТП | | для принципу ФОП ТП | |
| | | поопераційно, при незалежному формуванні параметрів | поопераційно, у взаємозв'язку із здійсненням попередньої операції | поопераційно, при незалежному формуванні параметрів | поопераційно, у взаємозв'язку із здійсненням попередньої операції |
| 005 | Горизонтально-фрезерна | 0,9963 | 0,9963 | 0,9963 | 0,9963 |
| 010 | Радіально-свердлильна | 0,8343 | 0,8312 | 0,9660 | 0,9624 |
| 015 | Горизонтально-фрезерна | 0,996 | 0,8279 | 0,996 | 0,9586 |
| 020 | Горизонтально-фрезерна | 0,9967 | 0,8252 | 0,9967 | 0,9554 |
| 025 | Токарно-гвинторізна | 0,7862 | 0,6487 | 0,8516 | 0,8136 |
| 030 | Токарно-гвинторізна | 0,9142 | 0,5931 | 0,9142 | 0,7438 |
| 035 | Радіально-свердлильна | 0,8859 | 0,5254 | 0,8859 | 0,659 |
| 040 | Радіально-свердлильна | 0,9412 | 0,4945 | 0,9412 | 0,6202 |
| 045 | Радіально-свердлильна | 0,9294 | 0,4596 | 0,9294 | 0,5764 |
| 050 | Радіально-свердлильна | 0,964 | 0,4431 | 0,9879 | 0,5694 |

На підставі отриманих результатів математичного моделювання забезпечення регламентованих параметрів якості виробу із врахуванням впливу елементів технологічної системи ВПД(З) сформовано такі висновки.

Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу із врахуванням впливу елементів технологічного середовища визначається

інтенсивністю їхніх відмов та тривалістю технологічних переходів на визначених технологічних операціях.

Встановлено, що при механічному обробленні заготовки виробу на визначеній технологічній операції вплив елементів технологічного середовища: металорізального верстата, верстатного пристрою та металорізального інструменту на забезпечення регламентованих параметрів якості деталі описується експоненціальним законом розподілу випадкових величин, причому ступінь їх впливу є різною. Найбільший вплив на незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції при досягненні граничного стану елементами технологічного середовища має металорізальний інструмент, як найслабша ланка технологічної системи (ВПД)(3). Вплив верстатного пристрою та металорізального верстату на незабезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні на технологічній операції при досягненні ними граничного стану є суттєво меншими.

При використанні принципу ФОП ТП встановлено, що ймовірність забезпечення вихідних параметрів якості виробу із врахуванням технологічного успадковування властивостей у технологічному ланцюжку «вхідна заготовка – готова деталь» є вищою.

5.5.2. Оптимізаційний синтез параметрів технологічного процесу виготовлення корпусу редуктора К 02.106

Синтез передбачає виконання таких задач:

- обґрунтування визначених показників надійності деталей машин відносно регламентованих показників надійності машини;
- встановлення граничного значення основного (машинного) часу на визначеному технологічному переході (технологічній операції) механічного оброблення виробу за визначеними показниками надійності;
- визначення оптимальних режимів оброблення виробу за граничним значенням основного (машинного) часу відповідно до розрахованих показників надійності.

Після математичного моделювання ймовірності забезпечення параметрів якості машинобудівного виробу на технологічних операціях його механічному оброблення узгоджуються отримані показники надійності виробу із регламентованими службовим призначенням вихідними параметрами надійності за умовою (2.88).

При невиконанні умови (2.88) оптимізуються параметри технологічної операції, зокрема елементи режимів різання, що визначають основний час оброблення або (та) стійкість інструменту на лімітуючому технологічному переході.

Даний підхід дозволяє врахувати показники надійності (розрахункові та регламентовані) та спростити пошук граничних значень основного часу при розробленні технологічних переходів і операцій у ТП виготовлення виробу. За встановленим обмеженням по основному часу оптимізуються елементи режимів різання відповідно до паспортних даних верстата.

Визначення регламентованих показників надійності деталей відносно регламентованих показників надійності машини не входить у задачі дисертаційної роботи. Регламентовані ДСТУ і службовим призначенням виробу значення гамма-відсоткового напрацювання до відмови приведено у п. 5.2.1.

На етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва за заданими регламентованими параметрами надійності та встановленим законом їх розподілу для визначеної технологічної операції визначають граничне (лімітуюче) значення основного машинного часу для технологічного переходу (операції тощо).

Максимум основного часу на визначеній технологічній операції є цільовою функцією задачі оптимізації та функцією синтезованих параметрів:

$$t_{0\max}(t, S, n(V)) \rightarrow \max, \quad (5.32)$$

де t , S , n , V – елементи режимів різання, відповідно глибина різання, величина подачі, частота обертання шпинделя, швидкість різання.

Система рівнянь для оптимізаційної задачі у загальному випадку для регламентованих гамма-відсоткових напрацювань до відмови має вигляд:

$$\begin{aligned}
 &P(t) = e^{-(A \cdot t)}; \\
 &\left\{ \begin{aligned}
 &P(t) = P(t_{\gamma_1}); \\
 &P(t) = P(t_{\gamma_2}); \\
 &P(t) = P(t_{\gamma_3}); \\
 &P(t) = P(t_{\gamma_4}); \\
 &P(t) = P(t_{\gamma_5}); \\
 &P(t) = P(t_{\gamma_6});
 \end{aligned} \right. \quad (5.33)
 \end{aligned}$$

де $P(t) = e^{-(A \cdot t)}$ – функція надійності, яка отримана на підставі розв’язку системи диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена, для визначеної технологічної операції; $P(t_{\gamma_1}), \dots, P(t_{\gamma_6})$ – регламентовані гамма-відсоткові напрацювання до відмови (п. 5.2.1).

Розв’язок оптимізаційної задачі для проєктування технологічного процесу виготовлення виробів має вигляд:

$$t_{0k} \leq [t_0], \quad (5.34)$$

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.

Основний (машинний) час на операціях механічного оброблення:

– при осьовій подачі металорізального інструменту (заготовки деталі) [75, 239]:

$$t_0 = \frac{L_{роб. ходу}}{S_{0насн} \cdot n_{насн}}, \quad (5.35)$$

– при хвилинній подачі металорізального інструменту (заготовки деталі) [75, 239]:

$$t_0 = \frac{L_{роб. ходу}}{S_{хв. насн}}, \quad (5.36)$$

де $L_{роб. ходу}$ – розрахункова довжина робочого ходу металорізального інструменту; $S_{0насн}$, $S_{хв. насн}$, $n_{насн}$ – значення відповідно осьової, хвилинної подач і частоти обертання шпінделя згідно паспортних даних металорізального верстату.

$$L_{роб.ходу} = \ell + \ell_1 + \ell_2, \quad (5.37)$$

де ℓ – довжина оброблюваної поверхні, мм; ℓ_1 – величина врізання інструменту, мм; ℓ_2 – величина перебігу інструменту, мм.

При обробленні конкретної поверхні деталі на технологічному переході визначеної технологічної операції розрахункова довжина робочого ходу інструменту залишається постійною.

За сталої величини робочого ходу інструмента ($L_{роб. ходу} = \text{const}$) критеріями оптимізації будуть такі умови:

$$\begin{aligned} S_0 &\geq [S_0]; \\ n &\geq [n]; \\ S_{хв.} &\geq [S_{хв.}]; \\ T_{MPI} &\leq [T_{MPI}] \end{aligned} \quad (5.38)$$

де $[S_0]$, $[n]$, $[S_{хв.}]$ – 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.

Результати розв’язання оптимізаційної задачі (30) для заданого гамма-відсоткового напрацювання до відмови (t_γ) при виготовленні корпуса редуктора К 02.106 на операції 005 Горизонтально-фрезерна приведено на рис. 5.7 і дод 3. Дана технологічна операція складається із одного технологічного переходу – фрезерування опорної площини.

Систему рівнянь (5.33) для операції 005 Горизонтально-фрезерна механічного оброблення корпуса редуктора К 02.106 представлено у загальному вигляді:

$$\begin{aligned} P(t) &= e^{-2,51659110^{-3} \cdot t}; \\ \left\{ \begin{aligned} P(t) &= 1,00; \\ P(t) &= 0,99; \\ P(t) &= 0,95; \\ P(t) &= 0,90; \\ P(t) &= 0,80; \\ P(t) &= 0,50. \end{aligned} \right. \quad (5.39) \end{aligned}$$

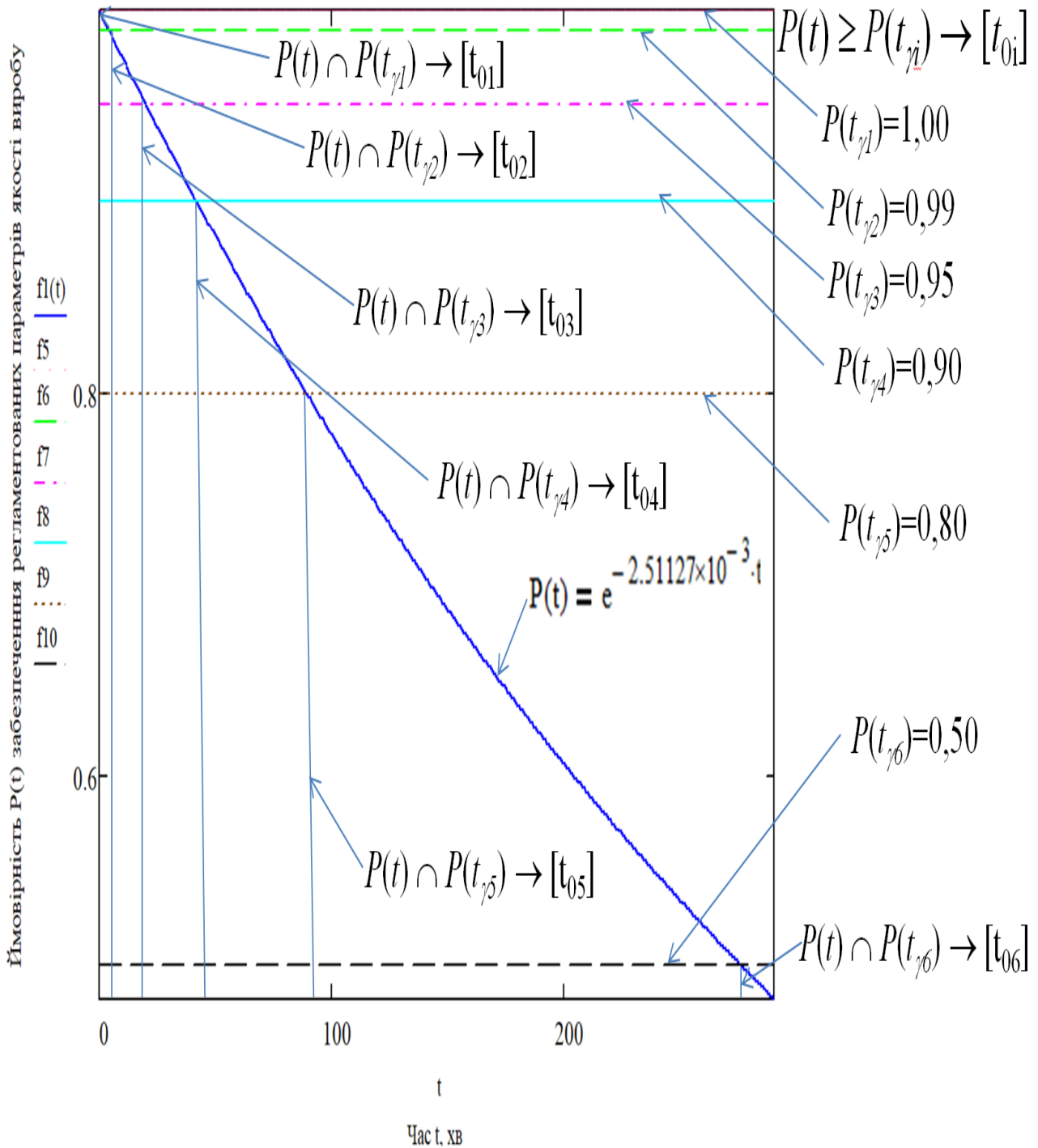


Рис. 5.7. Перевірка умови забезпечення працездатності виробу згідно регламентованих параметрів надійності (гамма-відсоткове напрацювання до відмови (t_{γ})) на операції 005 Горизонтально-фрезерна механічного оброблення корпусу редуктора за умови недостиження граничних станів металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті і металорізальним інструментом загалом та їх елементами зокрема

За результатами розрахунків у середовищі Mathcad (дод. 3) встановлено граничні значення основного часу, який обернено пропорційний режимам різання (подачі та частоті обертання): для $P(t_\gamma)=1$ $t_0=0$ хв; для $P(t_\gamma)=0,99$ $t_0=3,99$ хв; для $P(t_\gamma)=0,95$ $t_0= 20,38$ хв; для $P(t_\gamma)=0,9$ $t_0= 41,87$ хв; для $P(t_\gamma)=0,8$ $t_0= 88,67$ хв; для $P(t_\gamma)=0,5$ $t_0= 275,43$ хв.

При оптимізації режимів різання необхідно враховувати, що підвищення частоти обертання шпинделя та величини подачі зменшує основний час оброблення, при цьому також зменшується стійкість металорізального інструменту.

Розрахунки проведено для $P(t_\gamma)=0,99$ $t_0=3,99$ хв.

Умова (5.34) виконується:

$$t_{0\ 005} = 1,48 \leq [t_0] = 3,99 \text{ хв.}$$

Для заводського варіанту технологічного процесу під час фрезерування опорної площини на операції 005 Горизонтально-фрезерна механічного оброблення корпусу редуктора у технологічній документації прийнято такі режими різання: $t=3,99$ мм; $S_{хв.насп.} = 200$ мм/хв; $n_{насп.} = 125$ хв⁻¹, розрахункова довжина робочого ходу інструменту $L_{роб. ходу} = 296$ мм.

Для забезпечення заданого гамма-відсоткового напрацювання до відмови $P(t_\gamma)=0,99$ для граничного основного часу $[t_0] = 3,99$ хв граничне значення хвилинної подачі визначається із (5.36):

$$[S_{хв.}] = \frac{L_{роб. ходу}}{[t_0]}, \quad (5.40)$$

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

Виконання умови (5.38) за результатами (5.40) забезпечується ближчим більшим паспортним значенням $S_{хв.насп.} = 80$ мм/хв і наступними (за зростанням) значеннями із ряду подач для горизонтально-фрезерного верстата мод. 6Р82.

Зокрема, для прийнятого для заводського варіанту технологічного процесу $S_{хв.насп.} = 200$ мм/хв умова (5.38) виконується, оскільки:

$$S_{хв.насп.} = 200 \text{ мм/хв} \geq [S_{хв.}] = 74,19 \text{ мм/хв}.$$

5.6. Дослідження забезпечення регламентованих параметрів заготовки виробу при її обробленні із врахуванням впливу структури технологічних маршрутів оброблення заготовки (деталі) у системі «верстат - пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» на етапі виробництва деталей машин у їхніх життєвих циклах

Закони розподілу використовують у технології машинобудування для встановлення надійності проектного технологічного процесу стосовно забезпечення оброблення заготовок без браку; розрахунку кількості ймовірного браку при механічному обробленні; визначення кількості оброблених заготовок, що вимагають додаткову обробку; розрахунку економічної доцільності використання високопродуктивних верстатів заниженої точності; розрахунку налагодження верстатів; узгодження точності оброблення заготовок при різному стані обладнання, інструменту та технологічного оснащення [226].

Ймовірність забезпечення необхідної точності оброблення заготовок характеризується запасом точності даної технологічної операції [226]:

$$\psi = \frac{T_i}{\omega_i}, \quad (5.41)$$

де T_i – допуск на оброблення заготовки; ω_i – фактичне поле розсіювання розмірів заготовки.

Величина поля розсіювання для забезпечення точності оброблення при різних законах розподілу розмірів оброблюваних заготовок приведена у табл. 5.5.

Встановлено умову забезпечення регламентованих параметрів якості виробів за умови надійності елементів системи ВПД(3) [226]:

$$\psi = \frac{T_i}{\omega_i} \geq 1,2. \quad (5.42)$$

Згідно умови (5.42) для забезпечення регламентованих параметрів якості виробів за умови надійності елементів системи ВПД(3) допуск на оброблення визначеної поверхні заготовки повинен перевищувати фактичне розсіювання розмірів заготовки на 20 %.

Таблиця 5.5

Залежність величини поля розсіювання для забезпечення точності оброблення при різних законах розподілу розмірів оброблюваних заготовок

| № з/п | Забезпечувана точність/умови формування | Закон розподілу | Фактичне поле розсіювання розмірів заготовки ω |
|-------|---|-----------------------------------|---|
| 1. | IT9-IT14 | Нормальний розподіл (закон Гауса) | $6 \cdot \sigma$ |
| 2. | IT6-IT8 | Закон Сімпсона | $2 \cdot \sigma \cdot 6^{0,5} = 4,90 \cdot \sigma$ |
| 3. | Змінні систематичні похибки | Закон рівної ймовірності | $2 \cdot \sigma \cdot 3^{0,5} = 3,46 \cdot \sigma$ |
| 4. | | Закон Релея | $3,44 \cdot \sigma_0; 5,25 \cdot \sigma_R$ |

Умова (5.42) встановлює граничне співвідношення допуску на оброблення заготовки; ω_i – фактичне поле розсіювання розмірів заготовки

На підставі результатів ймовірностей забезпечення регламентованих параметрів якості корпуса редуктора К 02.106 на технологічних операціях його механічного оброблення при досягненні граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ впливу елементів системи ВПД(З) для принципу ООП ТП (табл. 5.3, 5.4) визначаємо сумарну ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості виробу при досягненні граничного стану МРВ, пристрою та МРІ (табл. 5.6).

Використовуючи формулу (2.88), отримаємо:

$$F_{MPB_MPr_MPI_i}(r, g, \dots, t) = 1 - P_{D(3)_i}(r, g, \dots, t), \quad (5.43)$$

де $F_{MPB_MPr_MPI_i}(r, g, \dots, t)$ – ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості виробу на технологічних операціях його механічного оброблення при досягненні граничного стану МРВ, верстатного пристрою та МРІ.

Таблиця 5.6

Граничні значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора при перебуванні у неграничному стані МРВ, пристрою на МРВ та МРІ для операцій технологічного процесу виготовлення корпусу редуктора

| № операції | Ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора за умови недосягнення граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ | Ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора за умови досягнення граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ |
|------------|---|---|
| 005 | 0,9963 (99,63 %) | 0,0037 (0,37 %) |
| 010 | 0,8295 (82,95 %) | 0,1705 (17,05 %) |
| 015 | 0,9960 (99,60 %) | 0,0040 (0,40 %) |
| 020 | 0,9967 (99,67 %) | 0,0033 (0,33 %) |
| 025 | 0,7862 (78,62 %) | 0,2138 (21,38 %) |
| 030 | 0,9142 (91,42 %) | 0,0858 (8,58 %) |
| 035 | 0,8859 (88,59 %) | 0,1141 (11,41 %) |
| 040 | 0,9412 (94,12 %) | 0,0588 (5,88 %) |
| 045 | 0,9294 (92,94 %) | 0,0706 (7,06 %) |
| 050 | 0,9640 (96,40 %) | 0,036 (3,60 %) |
| | Середнє значення – 92,39 % | Середнє значення – 7,61 % |

На підставі результатів аналізу прогнозування впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на операціях механічного оброблення корпусу редуктора встановлено, що середнє значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора за умови недосягнення граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ становить 92,39 % при граничному – 78,62 %. Застосувавши теорему додавання несумісних подій встановлено, що ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора за умови

досягнення граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ становить 7,61 % при граничному – 21,38 %.

Використовуючи розроблену методику прогнозування впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на операціях механічного оброблення різноманітних деталей (вали, важелі, корпуси, кронштейни, втулки) визначено середнє значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості при їх механічному обробленні за умови недосягнення граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ (≈ 83 %) при граничному – 76,5 %, і середнє значення ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів якості виробів при їх механічному обробленні за умови досягнення граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ (≈ 17 %) при граничному – 23,5 %.

Отже, на підставі проведених досліджень і опрацювання статистичних даних по аналізу ТП виготовлення машинобудівних виробів встановлено, що граничне значення ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів якості деталей машин при їх механічному обробленні за умови досягнення граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ становить 23,5 % або 0,235, що забезпечує коефіцієнт запасу 1,235.

Формула (5.42) із врахуванням результатів проведених досліджень матиме вигляд:

- при обробленні корпуса редуктора К 02.106

$$\psi = \frac{T_i}{\omega_i} \geq 1,2138; \quad (5.44)$$

- при обробленні широкої номенклатури деталей

$$\psi = \frac{T_i}{\omega_i} \geq 1,235. \quad (5.45)$$

5.7. Висновки розділу 5

1. Дослідження процесу забезпечення регламентованих параметрів якості виробу при його механічному обробленні із врахуванням впливу технологічної

системи «верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка)» реалізується за допомогою математичного апарату марковських процесів. Визначена операція технологічного процесу виготовлення деталі описується технологічним графом надійності для експоненціального закону розподілу випадкових величин і системою диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена.

2. Встановлено, що при експериментальній апробації запропонованої методики при виготовленні чавунного корпусу редуктора К.02.106 середнє значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості за умови недосягнення граничного стану елементами технологічного середовища: пристроєм на металорізальному верстаті, металорізальним інструментом і металорізальним верстатом становить 92,39 % при граничному – 78,62 %. При цьому ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора за умови досягнення граничного стану металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті та металорізальним інструментом становить 7,61 % при граничному – 21,38 %.

3. На підставі апробації розробленої методики впливу елементів технологічної системи ВПД(З) на забезпечення регламентованих параметрів якості на операціях механічного оброблення різноманітних деталей (вали, важелі, корпуси, кронштейни, втулки) визначено середнє значення ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості при їх механічному обробленні за умови недосягнення граничного стану металорізальним верстатом, пристроєм на металорізальному верстаті та металорізальним інструментом становить (≈ 83 %) при граничному – 76,5 %. При цьому отримане на підставі проведених досліджень граничне значення ймовірності незабезпечення регламентованих параметрів якості деталей машин при їх механічному обробленні за умови досягнення граничного стану верстатом, пристроєм на верстаті та металорізальним інструментом – 23,5 % або 0,235, що забезпечує коефіцієнт запасу точності 1,235.

4. При апробації використаної методики встановлено, що металорізальний інструмент є найслабшою ланкою технологічної системи з позиції надійності та має найбільший вплив на формування регламентованих параметрів якості виробів, причому стійкість металорізального інструменту служить його середнім напрацюванням до відмови. Металорізальний верстат з-поміж елементів

технологічного середовища має найменший вплив на формування регламентованих параметрів якості виробів.

5. Керування процесом забезпечення показників надійності елементів системи ВПД(З) на визначеній технологічній операції технологічного процесу виготовлення виробу здійснюється за рахунок оптимізації значення інтенсивності відмов металорізального верстата, верстатного пристрою, металорізального інструменту та раціональним вибором режимів різання. Керування процесом забезпечення показників надійності елементів системи ВПД(З) на визначеному технологічному переході технологічної операції технологічного процесу виготовлення виробу забезпечується за рахунок оптимізації значення інтенсивності відмов металорізального інструменту та раціональним вибором режимів різання. Підвищення частоти обертання шпинделя і (або) величини подачі з зменшує основний час оброблення та збільшує ймовірність забезпечення регламентованих параметрів якості заготовки виробу. Проте інтенсифікація режимів оброблення поверхонь заготовки знижує стійкість металорізального інструменту та підвищує ймовірність незабезпечення регламентованих параметрів якості заготовки виробу при досягненні граничного стану металорізальним інструментом.

6. При оптимізації режимів різання для операції 005 Горизонтально-фрезерна показано, що для регламентованого гамма-відсоткового напрацювання до відмови $P(t_{\gamma})=0,99$ лімітуюче значення хвилинної подачі $[S_{xв}] = 70,18$ мм/хв, що забезпечується ближчим більшим паспортним значенням $[S_{xв.наст.}]=80$ мм/хв для горизонтально-фрезерного верстата мод. 6Р82.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему в галузі технології машинобудування – розроблення узагальненого методологічного підходу для керування технологічним успадкуванням 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 успадкування, яка базується на врахуванні лише регламентованих параметрів точності і шорсткості поверхонь для технологічних переходів і операцій потребує структурного та методологічного вдосконалення.

2. Розроблена система 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 проектування під час виготовлення машинобудівних виробів, та враховує технологічне успадкування параметрів якості за критерієм однорідності матеріалу при проектуванні раціональних технологічних маршрутів оброблення виконавчих поверхонь.

3. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності важконавантажених деталей машин реалізується в межах підсистеми аналізу технологічного успадкування під час формоутворення виробу (PSPAS-TI системи аналізу формоутворення виробу (PSPAS-системи). Для системи PSPAS-TI

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-ТИНМВ) і матеріалу під час формоутворення заготовки виробу (PSPAS-ТИНМВ), що формують підсистему аналізу технологічного успадкування 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 успадкування параметрів під час проєктуванні 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 успадкування від заготовки до k -го технологічних переходів і операцій із дотриманням вимог: $m_{x_0} < m_{x_1} < \dots < m_{x_k} < \dots < m_{x_n} \rightarrow \infty$; $v_{x_0} > v_{x_1} > \dots > v_{x_k} > \dots > v_{x_n} \rightarrow 0$; $A_{x_0} < A_{x_1} < \dots < A_{x_k} < \dots < A_{x_n} \rightarrow l$; $D_{x_0} > D_{x_1} > \dots > D_{x_k} > \dots > D_{x_n} \rightarrow 0$; $\varepsilon_{x_1} > \dots > \varepsilon_{x_k} > \dots > \varepsilon_{x_n} \rightarrow 0$.

5. Встановлено, що в умовах самоорганізації систем механічного оброблення для забезпечення регламентованих параметрів якості деталей машин проєктування раціональної структури технологічного маршруту оброблення їхніх поверхонь реалізують за зміною показників однорідності матеріалу виробів для принципу функціонально-орієнтованого проєктування. Поряд з тим вибір методів технологічних обробок для принципу об'єктно-орієнтованого проєктування здійснюють за зміною показників точності та якості поверхневого шару. Для принципу функціонально-орієнтованого проєктування 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-TIM) складається із підсистем аналізу гомогенності матеріалу вхідної заготовки (PSPAS-TIHMB) і аналізу гомогенності матеріалу під час формоутворення заготовки виробу (PSPAS-TIHMW). 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 40X 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 40X 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 успадковування 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 оброблення алюмінієвих заготовок визначають перетворення структурно-однорідного матеріалу заготовок у структурно-однорідний

матеріал готових деталей, що забезпечується збільшенням значень коефіцієнтів гомогенності Вейбулла (m) і зменшенням значень технологічної пошкоджуваності D . Під час механічного оброблення сталевих заготовок виробів методами лезової та абразивної обробок 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 пошкодження 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 закономірностями підсистеми модифікування поверхні під час поверхневого пластичного деформування (PSPAS-SPD/S/ТИ) внаслідок взаємовпливу підсистем аналізу поверхневого пластичного деформування (PSPAS-SPD), модифікування поверхневого шару

виробу (PSPAS-S) і технологічного успадковування при формоутворенні виробу (PSPAS-TI).

9. Встановлено, що за наявності технологічних «бар'єрів» у структурі технологічного процесу принцип технологічного успадковування 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 t_m . Подальше почергове оброблення кульками $\varnothing 8,5$ мм та очищення поверхні уралітом погіршує висотні параметри якості поверхневого шару, однак підвищує параметр t_m (з 0,5287 до 0,5638–0,5870). Модифікування поверхні твердим сплавом ВК8 покращує як висотні параметри профілю виконавчої поверхні, так і значення t_m (з 0,5222 (після чистового точіння) до 0,7486). Модифікування поверхні сприяє формуванню стійкого до зношування експлуатаційного рельєфу. Ефективність реалізації принципу функціонально-орієнтованого проєктування під час виготовлення втулок циліндрових бурових pomp НБ32 апробовано на етапі натурних випробувань. Середнє напрацювання до відмови віброзміцнених втулок підвищилося у середньому на 65 % одночасно із заміною матеріалу вхідної заготовки зі сталі 70, 40Х на сталь 20, сталь 45Х.

10. Під час дослідження процесу забезпечення регламентованих параметрів якості виробу під час його виготовлення з урахуванням впливу технологічної системи верстат – пристрій – інструмент – деталь (заготовка) (ВПД(З)) 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 корпусу 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 корпусу 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abrão, A., Ribeiro, J., Davim, J.P.: Surface Integrity in Machining. London, Springer-Verlag (2011). doi: 10.1007/978-1-84996-450-0_4
2. Altintas, Y.: Manufacturing automation : metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. Cambridge UP, Cambridge, UK (2001). doi: 10.1115/1.1399383
3. Application of Markov techniques. The International Standard IEC 61165 (1995-01)
4. Atkins, A.G.: Fracture mechanics and metalforming: damage mechanics and the local approach of yesterday and today. In: Rossmann HP (ed.) Fracture Research in Retrospect, an Anniversary Volume in Honour of George R. Irwin's 90th Birthday. Rotterdam: A.A. Balkema. pp. 327-352 (1997)
5. Bai, Y.L., Wierzbicki, T.: Application of extended Mohr-Coulomb criterion to ductile fracture. International Journal of Fracture. 161 (1), 1-20 (2010). doi: 10.1007/s10704-009-9422-8
6. Bai, Y.L., Wierzbicki, T.A.: A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence. International Journal of Plasticity. 24 (6), 1071-1096 (2008). doi: 10.1016/j.ijplas.2007.09.004
7. Bao, Y., Wierzbicki, T.: A comparative study on various ductile crack formation criteria. Journal of Engineering Materials and Technology. 126 (3), 314-324 (2004). doi: 10.1115/1.1755244
8. Bao, Y., Wierzbicki, T.: On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. International Journal of Mechanical Sciences. 46 (1), 81-98 (2004). doi:10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006
9. Bertsche, B.: Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008). doi: 10.1007/978-3-540-34282
10. Besson, J.: Continuum models of ductile fracture: a review. International Journal of Damage Mechanics. 19 (1), 3-52 (2009). doi: 10.1177/1056789509103482

11. Bonora, N., Gentile, D., Pironi, A., et al.: Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments. *International Journal of Plasticity*. 21 (5), 981-1007 (2005). doi: 10.1016/j.ijplas.2004.06.003
12. Cazacu, O., Plunkett, B., Barlat, F.: Orthotropic yield criterion for hexagonal closed packed metals. *International Journal of Plasticity*. 22 (7), 1171-1194 (2006). doi: 10.1016/j.ijplas.2005.06.001
13. Cazacu, O.: A criterion for description of anisotropy and yield differential effects in pressure-insensitive metals. *International Journal of Plasticity*. 20 (11), 2027-2045 (2004). doi: 10.1016/j.ijplas.2003.11.021
14. Davim, J.P.: *Machining of Hard Materials*. London, Springer (2011). doi: 10.1007/978-1-84996-450-0
15. Dunand, M., Mohr, D.: Hybrid experimental-numerical analysis of basic ductile fracture experiments for sheet metals. *International Journal of Solids and Structures*. 47 (9), 1130-1143 (2010). doi: 10.1016/j.ijsolstr.2009.12.011
16. EN 1993-1-9 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
17. Eszlinger, P.: Das Problem der Werkstoffwahl bei Verschleisssteilen. *VDI Zeitschrift*. 56, 1209-1218 (1963)
18. Haken, H.: *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems: Third Enlarged Edition*. Berlin: Springer (2006). doi: 10.1007/3-540-33023-2
19. Kachanov, L.M.: *Introduction to continuum damage mechanics*. Dordrecht, Boston, Martinus Nijhoff Publishers (1986)
20. Kachanov, L.M.: Rupture time under creep conditions. *International Journal of Fracture*. 97 (1-4), 11-18 (1999)
21. Klocke, F., Beck, T., Hoppe, S., Krieg, T.: Examples of FEM application in manufacturing technology. *Mat. Proc. Technol.* 120, 450-457 (2002). doi: 10.1016/S0924-0136(01)01210-9

22. Klocke, F.: *Manufacturing Processes: Cutting*. Berlin, Springer-Verlag (2011). doi: 10.1007/978-3-642-11979-8
23. Korendiy, V., Shenbor, V., Havrylchenko, O., Brusentsov, V.: Improvement of vibratory conveying and manipulating machines. *Scientific Journal of TNTU*. 92 (4), 68-82 (2018). doi: 10.33108/visnyk_tntu2018.04
24. Kusyi, 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*. 18, 101-108 (2020)
25. Kusyi, 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*. 1426 (1) (2020) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1426/1/012034/pdf>
26. Kusyi, Y., Kuk, A., Kostiuik, O. Use of vibration technologies for ensuring quality parameters of products surfaces. B: «Thermal science and engineering of Serbia»: Book of abstracts 19th International conference. p 142 (2019)
27. Kusyi, Y., Kuk, A., Onysko, O., Lukan, T., Pituley, L., Shuliar, I., Havryliv, Y.: Application of the criterion of technological damageability in mechanical engineering. B: «Social and technological development»: Book of abstracts VIII International conference. p 56. Banja Luka, Republic of Srpska (2020)
28. Kusyi, Y., Kuk, A., Onysko, O., Lukan, T., Pituley, L., Shuliar, I., Havryliv, Y.: Application of the criterion of technological damageability in mechanical engineering. *STED Journal*. 2 (2), 13-21 (2020). doi: 10.7251/STED0220013K
29. Kusyi, Y., Kuk, A.: Analysis of the rational route of aluminium alloy castings mechanical treatment on the basis of the reliability criterion. B: International conference on applied sciences: Book of abstracts. p 41. Humedora (2019)
30. Kusyi, Y., Lychak, O., Radu, S., Moraru, R., Kojić, D.: Research of the finishing and strengthening technological operations by using SADT-technologies. B: «Прогресивні технології в машинобудуванні»: Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-практичної конференції. pp 27-30. Львів (2020)

31. Kusyi, Y., Stupnytskyy, V.: Optimization of the technological process based on analysis of technological damageability of castings. B: «Design, simulation, manufacturing: the innovation exchange»: Proceedings of 3rd International conference. p 82 (2020)
32. Kusyi, Y., Stupnytskyy, 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. 1, 276-284 (2020). doi:10.1007/978-3-030-50794-7
33. Kusyi, Y.: Analyze of the blank production in the life cycle of a part by means of the technological inheritability. B: «GOAL AND ROLE OF WORLD SCIENCE IN MODERNITY»: Матеріали VII Міжнародної наук.-практ. конф. pp. 170-174, Гельсінкі, Фінляндія (2020)
34. Kusyi, Y.M., Stupnytskyy, V.V., Kuk, A.M., Topilnytskyy, V.G.: Development of the fundamental diagram of the formation and transformation of the products properties during their manufacturing Journal of Physics: Conference Series. 1781 (2021). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1781/1/012027>
35. Kusyi, Ya., Lychak, O., Kuk, A., Kostyuk, O., Novitskyi, Iu.: 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)
36. Kusyj, J., Kuk, A., Topilnytskyy, V.: Vibratory-centrifugal strengthening's influence on failure-free parameters of drilling pumps bushings. Technology audit and production reserves. 1/1 (39), 4-12 (2018). doi:10.15587/2312-8372.2018.123838
37. Kusyj, J.M., Topilnytskyj, V.G.: Influence of structural components placement on casting technological damages formation. Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 5 (1330), 41-45 (2019). doi:10.20998/2413-4295.2019.05.06

38. Kuzin, O., Kusyj, J., Kuzin, N.: Analysis of technological damageability of castings manufactured in sand molds. *Technology audit and production reserves*. 3/1, 17-23 (2017). doi: 10.15587/2312-8372.2017.104769
39. Lanets, O., Borovets, V., Lanets, O., Shpak, Y., Lozynskyy, V.: Synthesis of structure and research of operation of resonance two-mass vibrating table with electromagnetic drive. *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*. 1, 9-34 (2015)
40. Lebedev, A.A., Muzyka, N.R., Volchek, N.L.: A new method of assesment of material degradation during its operating time. *Zaliznychnyi Transport Ukrainy*. 5, 30-33 (2003)
41. Lemaitre, J.: A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology—Transactions of the ASME*. 107 (1), 83-89 (1985)
42. Lemaitre, J.: *A Course on Damage Mechanics*. Berlin, Springer-Verlag (1992)
43. Lian, J., Sharaf, M., Archie, F., Muenstermann, S.: A hybrid approach for modelling of plasticity and failure behaviour of advanced high-strength steel shetts. *International Journal of Damage Mechanics*. 22 (2), 188-218 (2013). doi: 10.1177/1056789512439319
44. McClintock, F.A.: A criterion for ductile fracture by growth of holes. *Journal of Applied Mechanics*. 35 (2), 363-371 (1968)
45. Mirone, G., Corallo, D.: A local viewpoint for evaluating the influence of stress triaxiality and Lode angle on ductile failure and hardening. *International Journal of Plasticity*. 26 (3), 348-371 (2010). doi: 10.1016/j.ijplas.2009.07.006
46. Murakami, S.: *Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture*. Dordrecht/Heidelberg/London/New York, Springer (2012). doi: 10.1007/978-94-007-2666-6
47. Muzyka, N.R., Shvets, V.P.: Effect of a Loading Mode on Damage Accumulation in the Material. *Strength of Materials*. 46 (1), 105-109 (2014). doi: 10.1007/s11223-014-9

48. Novikov, F., Marchuk, V., Marchuk, I., Shkurupiy, V., Polyansky, V.: Technological Support of Surface Layer for Optical Metalware. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 412-421 (2021). doi:10.1007/978-3-030-68014-5
49. Palmgren, A.: Die lebensdauer von kugellagern. *Z. Ver. Dtsch. Ind.* 68, 339-341 (1924)
50. Rice, J.R., Tracey, D.M.: On ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 17 (3), 201-217 (1969)
51. Rosen, C.G.: *Wear in Diesel Engines*. Mechanical Wear. ASM (1950)
52. Shatskyi, I., Ropyak, L., Velychkovych, A.: Model of contact interaction in threaded joint equipped with spring-loaded collet. *Engineering Solid Mechanics*. 8 (2), 301-312 (2020). doi: 10.5267/j.esm.2020.4.002
53. Shatskyi, I.P., Perepichka, V.V., Ropyak, L.Y.: On the influence of facing on strength of solids with surface defects. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 42 (1), 69-76 (2020). doi: 10.15407/mfint.42.01.0069
54. Shenbor, V., Koruniak, P., Korendiy V., Brusentsov V., Brusentsova M.: Analysis and Improvement of Two-Mass Vibrating Tubular Conveyers with Two-Cycle Electromagnetic Drive. *Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science*. 2/1, 55-64 (2016).
55. Smith G.: *Cutting Tool Technology: Industrial Handboo*. London: Springer, (2008). doi: 10.1007/978-1-84800-205-0_1
56. Stupnytskyy, V., Hrytsay, I.: Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology. *Archive of mechanical engineering*. 67 (2), 1-19 (2020). doi: 10.24425/ame.2020.131688
57. Stupnytskyy, V.: Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2 (9), 1181-1186 (2013)

58. Tasan, C.C., Hoefnagels, J.P.M., ten Horn, C.H.L.J., et al.: Experimental analysis of strain path dependent ductile damage mechanics and forming limits. *Mechanics of Materials*. 41(11), 1264-1276 (2009). doi: 10.1016/j.mechmat.2009.08.00
59. Tvergaard, V.: Influence of voids on shear band instabilities under plane-strain conditions. *International Journal of Fracture*. 17 (4), 389-407 (1981)
60. Tvergaard, V., Needleman, A.: Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*. 32 (1), 157-169 (1984)
61. Tvergaard, V.: On localization in ductile materials containing spherical voids. *International Journal of Fracture*. 18 (4), 237-252 (1982)
62. Vlasiy, O., Mazurenko, V., Ropyak, L., Rogal, O.: Improving the aluminum drill pipes stability by optimizing the shape of protector thickening. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1 (7 (85)), 25-31 (2017). doi: 10.15587/1729-4061.2017.65718
63. Wellinger, V.K., Uetz, H.: Gleitverschleiss, Spulverschleiss, Strahlenverschleiss unter der Wirkung von kornigen Stoffen. *VDI Forschungsheft*. 449, 26-32 (1955)
64. Yoshimura, M.: System Design Optimization for Product Manufacturing. *Concurrent Engineering*. 15 (4), 329-343 (2007). doi:10.1177/1063293x07083087
65. Албакуш, А., Оргіян, О.А., Баланюк, Г.В.: Технологічна динаміка тонкого розточування отворів малого діаметра. *Перспективні технології та прилади*. 14, 6-11 (2019). doi: 10.36910/6775-2313-5352-2019-14-1
66. Альгин, В.Б., Блюменштейн В.Ю., Васильев, А.С. и др.: Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин. Минск, Беларуская навука (2010)
67. Андронов, О.Ю., Кузнецова, К.О.: Управління рівнем надійності експлуатації збірних різців важких верстатів. *Научный вестник ДГМА*. 1 (13Е), 10-15 (2014)
68. Аникеева, О.В., Ивахненко, А.А.: Рациональная эксплуатация технологического оборудования на машиностроительных предприятиях. *Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Техника и технологии*. 1, 75-79 (2013)

69. Асланян, Э.Г.: Метрологическое обеспечение измерений твердости. Измерительная техника. 1, 45-50 (2005)
70. Афтаназив, И.С., Берник, П.С., Сивак, Р.И., Клименко, А.Д.: Вибрационно-центробежная упрочняющая обработка деталей машин. Винница: ВДАУ (2002)
71. Афтаназів, І.С., Гавриш, А.П., Киричок, П.О. та інші: Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням. Житомир, ЖІТІ (2001)
72. Афтаназів, І.С., Шевчук Л.І., Строган О.І., Струтинська Л.Р.: Підвищення міцності та надійності барабанів коліс літаків зміцнювальною обробкою. Авіаційно-космічна техніка та технологія. 5, 47-57 (2018). doi: 10.32620/aktt.2018.5.08
73. Афтаназів, І.С.: Використання вібрацій для зміцнення деталей. Вибрации в технике и технологиях. 1 (2), 27-34 (1995)
74. Бабичев, А.П., Трунин, В.Б., Самодумский, В.П., Устинов, В.П.: Вибрационные станки для обработки деталей. М.: Машиностроение (1984)
75. Базров, Б.М.: Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. М. Машиностроение (2007)
76. Байков, В.М., Бутушин, С.В., Городецкий, В.Н. и др.: Исследование деградации механических характеристик конструкционного сплава Д16АТ в результате воздействия эксплуатационной наработки. Зав. лаб. 11, 50-54 (2003)
77. Балакшин, Б.С.: Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение (1969)
78. Безъязычный, В.Ф., Корнеев, В.Д., Волков, С.А.: Основы технологии машиностроения: Учебное пособие. Рыбинск: РГАТА (2008)
79. Безъязычный, В.Ф.: Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин. Справочник. Инженерный журнал. 4, 9-16 (2000)

80. Безъязычный, В.Ф.: Метод подобия в технологии машиностроения. М. : Машиностроение (2012)
81. Безъязычный, В.Ф.: Определение технологических условий механической обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства деталей авиационных двигателей. Научно-технические технологии в машиностроении. 7, 14-24 (2015)
82. Блюменштейн, В.Ю.: Научные основы технологии машиностроения, (2011).
83. Блюменштейн, В.Ю.: Основы технологии машиностроения: учеб. пособие. Кемерово: ГУ КузГТУ (2011)
84. Бобало, Ю.Я., Волочій Б.Ю., Лозинський О. Ю. та ін.: Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: Монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки (2013)
85. Богатов, А.А., Мижирицкий, О.И., Смирнов, С.В.: Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия (1984)
86. Богатов, А.А.: Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ (2002)
87. Божидарнік, В.В., Григор'єва, Н.С., Шабайкович В.А.: Технологія виготовлення деталей виробів: навч. посібник. – Луцьк: Надстир'я (2006)
88. Бойцов, В.В.: Комплексная нормализация элементов производственного процесса – основа дальнейшего совершенствования авиационного производства. М., Оборонгиз, (1958)
89. Бойцов, В.В.: Механизация и автоматизация в мелкосерийном и серийном производствах. Комплексная стандартизация элементов производственных процессов в машиностроении. М., Машиностроение (1971)
90. Болотин, В.В.: Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение (1984)
91. Болотин, В.В.: Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение (1990)
92. Боровець, В.М., Боровець, Я.В.: Вплив робочого середовища на кінематику вібраційних машин. Вібрації в техніці та технологіях. 2 (82), 10-15 (2016).

93. Боровець, В.М., Шенбор, В.С., Савчин, Б.М.: Вібраційна обробка деталей із застосуванням обертових пристроїв. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 40, 35-38 (2006)
94. Боровець, В.М., Шенбор, В.С.: Вібраційна обробка плоских довговимірних деталей. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 41, 9-14 (2007)
95. Братухин, А.Г., Дмитриев, В.Г.: CALS — стратегия наукоемкого машиностроения. Наукоемкие технологии. 3, 10-25 (2007)
96. Булычев, С.И., Алехин В.П.: Определение предела текучести по фактической площади контакту сферического индентора при нано-, микро- и макроиндентировании. Деформация и разрушение материалов. 1, 30-360 (2007)
97. Васильков, Д.В., Вейц, В.Л., Шевченко, В.С.: Динамика технологической системы механической обработки. СПб.: Инструмент, (1997)
98. Васильков, Д.В., Козлова, Е.Б.: Применение интегрированного конечноэлементного комплекса COSMOS/M к решению задач термоупругопластичности. Машиностроение и автоматизация производства. 4, 122-130 (1996)
99. Валетов, В.А., Иванов А.Ю.: Микрогеометрия поверхностей деталей и их функциональные свойства. Известия вузов. Приборостроение. 53, 8, 7-11 (2010)
100. Васильев, А.С., Дальский, А.М., Клименко, С.А. и др.: Технологические основы управления качеством машин. М.: Машиностроение (2003)
101. Васильев, А.С., Кондаков, А.И., Клименко, С.А., Хейфец, М.Л., Гайко, В.А.: Технологическое управление наследованием эксплуатационных показателей качества упрочненных поверхностей. Упрочняющие технологии и покрытия. 1, 32-38 (2011)
102. Вейбулл, В.: Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение (1964)
103. Виттенберг, Ю.Р.: Шероховатость поверхности и методы её оценки. Л. :

Судоостроение (1971)

104. Гаврильченко, О.В., Ланець, О.С., Гурський, В.М., Шпак, Я.В.: Дослідження перехідного режиму роботи вібраційної машини з просторовим рухом робочого органу, створеної на основі теорії синфазних коливань. Вісник Національного ун-ту «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 560, 47-53 (2006)
105. Гаврильченко, О.В., Повідайло, В.О., Захаров, В.М.: Дослідження впливу розміру зерна абразиву на площинність притирів та деталей, які обробляються на вібровикінчувальних верстатах. Вісник Національного ун-ту «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 642, 3-7 (2009)
106. Галин, Л.А.: Контактные задачи теории упругости. М.: Гостехиздат, (1953)
107. Горин, Д.И.: Износ деталей в абразивной среде. Сб. трудов Белорусского политехнического института. 57, 32-40 (1957)
108. Горин, Д.И.: К вопросу увеличения износостойкости шарнира гусеничной цепи трактора ДТ-54. In: Сб докладов 2-й Белорусской научно-производственной конференции. Минск, Госиздат БССР, 1955.
109. ГОСТ 27.003-2016. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. [Действ. от 2017-09-01]. Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. Переиздание август 2018. 20 с.
110. Гумеров, А.Г., Зайнуллин, Р.С., Ямалеев, К.М., Росляков, А.В.: Старение труб нефтепроводов. М.: Недра (1995)
111. Гурей І.В., Гурей Т.А.: Підвищення довговічності напрямних технологічного обладнання фрикційним зміцненням. Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 702, 19-24 (2011)

112. Гурей І.В., Гурей Т.А.: Точність оброблених поверхонь після їх фрикційного зміцнення. Прогресивні технології і системи. 1 (46), 107-112 (2013)
113. Гурей, І.В., Гурей Т.А.: Підвищення довговічності ланцюгів конвейєрів фрикційним зміцненням. Вісник ТДТУ. 4/3, 91-93 (1999)
114. Гурський, В.М.: Багатокритеріальний аналіз і синтез нелінійних резонансних вібраційних машин : монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки (2017).
115. Гутерман, В.М., Тенненбаум, М.М.: Влияние микроструктуры на износостойкость углеродистых сталей при абразивном изнашивании. *Металловедение и обработка металлов.* 11, 15-22 (1956)
116. Дальский, А. М., Базров, Б. М., Васильев, А. С. и др.: Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд. МАИ (2000).
117. Дальский, А.М.: Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение (1975).
118. Дель, Г.Д.: Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение (1971)
119. Демкин, Н.Б., Коротков, М.А.: Оценка топографических характеристик шероховатой поверхности с помощью профилограмм. – В кн.: Механика и физика контактного взаимодействия. Калинин: КГУ, (1976)
120. Демкин, Н.Б., Рыжов, Э.В.: Качество поверхности и контакт деталей машин. М. : Машиностроение (1981)
121. Демкин, Н.Б.: Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М. : Наука (1970)
122. Демьянюк, Ф.С.: Технологические основы поточно-автоматизированного производства Учебное пособие. М.: Высшая школа (1968)
123. Дзугутов, М.Я.: Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. М.: Металлургия (1977)

124. Дружинин, В.В., Конторов, Д.С.: Проблемы системологии: проблемы теории сложных систем. М.: Сов. радио (1976)
125. Дружинин, В.В., Конторов, Д.С.: Системотехника. М.: Радио и связь (1985)
126. ДСТУ 2444-94. Розрахунки та випробування на міцність. Опір втомі. Терміни та визначення. - К.: Держстандарт України, 1994. - 71 с.
127. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення
128. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення
129. ДСТУ 3321-2003. Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять
130. Дунин-Барковский, И.В., Карташова А.Н.: Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение (1978)
131. Дьяченко, П.Е., Вайнштейн, В.Э., Розенблаум, В.С.: Количественная оценка неровностей обработанных поверхностей. М.: Машгиз (1952)
132. Дьяченко, П.Е.: Влияние шероховатости поверхности на её знос. М. ; Л. : Машгиз (1949)
133. Дьяченко, П.Е.: Исследования зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки. М. ; Л. : Изд-во АН СССР (1949)
134. Закалов, О.В., Закалов, І.О.: Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя (2011)
135. Залога, В.А., Дядюра К.А.: Функциональный подход к проектированию машиностроительного изделия. Вісник Національного техн. ун-ту «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. 5, 18-31 (2010)
136. Залога, В.А., Нагорный, В.М., Нагорный, В.В.: Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса : Монография. Сумы: Изд-во Сумского государственного университета (2016)

137. Залога, В.О., Шаповал, Ю.В., Дрофа, К.А.: Скінчено-елементний аналіз динамічного стану металообробної технологічної системи. *Technology audit and production reserves*. 3/1 (29), 33-39 (2016). doi: 10.15587/2312-8372.2016.71503
138. Залога, В.О., Шаповал, Ю.В.: Аналіз динамічного стану технологічної системи в залежності від положення двигуна приводу подач. *Резание и инструмент в технологических системах*. 86, 18-25 (2016)
139. Залога, В.О., Шаповал, Ю.В.: Методика оцінювання динамічного стану системи різання шляхом визначення геометричних параметрів якості обробленої поверхні. *Резание и инструмент в технологических системах*. 87, 63-71 (2017)
140. Информационные технологии в наукоемком машиностроении: компьютерное обеспечение индустриального бизнеса / Под общ. ред. А. Г. Братухина. Киев: Техника (2001)
141. Ишуткин, В.И.: Технологическая надежность системы СПИД. М. : Машиностроение (1973)
142. Іванов, В.О., Дегтярьов, І.М., Залога, В.О., Басова, Є.В. Експериментальне дослідження точності механічної обробки деталей типу важелів. - Вісник Національного техн. ун-ту «ХПІ». Серія: «Технології в машинобудуванні». 34 (1310), 3-10 (2018)
143. Каледин, Б.А., Чепа, П.А.: Повышение долговечности деталей поверхностным деформированием. Минск: Наука и техника (1974)
144. Кацев, П.Г.: Статистические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение (1974)
145. Качанов, Л.М.: Теория ползучости. М.: Физматлит (1960)
146. Кирилів, Я.Б., Кук, А.М.: Шорсткість і точність обробки поверхонь деталей вібраційно-відцентровим зміцненням. Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 560, 3-7 (2006)
147. Клименко, Г.П., Васильченко, Я.В., Шаповалов, М.В. Качество и

- надежность эксплуатации сборных твердосплавных инструментов. Вісник Національного техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. 34 (1310), 34-39 (2018)
148. Ковальов, В.Д., Васильченко, Я.В., Антонюк, В.С., Волошин, О.І., Рябченко, С.В.: Технологічні напрямки щодо забезпечення якісного виготовлення крупногабаритних редукторів. Вісник Національного техн. ун-ту «ХПІ». Серія «Технології в машинобудуванні». 26 (1248), 19-30 (2017)
149. Ковальов, В.Д., Мельник, М.С., Васильченко, Я.В., Саєнко, М.О.: Оптимізація процесу важкого точіння з використанням систем адаптивного управління. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2 (44), 141-146 (2018)
150. Колесов, В.Г.: Износостойкость наплавочных сплавов при работе в абразивной среде. Сварочное производство. 11, 20-24 (1960)
151. Колесов, И.М.: Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение (2000)
152. Колмаков, А.Г., Терентьев, В.Ф., Бакиров, М.Б.: Методы измерения твердости: справочное издание. М. Интернет инжиниринг (2000)
153. Колмогоров, В.Л., Джонсон, У., Рид, С.Р., Корбетт, Г.Г.: Ударное нагружение и разрушение твердых тел.: обзор и новая теория. Екатеринбург: УрО РАН (2006)
154. Колмогоров, В.Л.: Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УГТУ (2001)
155. Комаровский, А.А.: Физическая природа твердости. Контроль. Диагностика. 1, 41-43 (2003)
156. Коновалов, Е.Г., Сидоренко, В.А.: Чистовая упрочняющая ротационная обработка поверхностей. Минск : Выш. школа (1968).
157. Кононюк, А. Е.: Системология. Общая теория систем. В 4-х кн. Кн 1. Начала. К.: Освіта України (2014)
158. Костецкий, Б.И.: Поверхностная прочность материалов при трении. Киев: Техника (1976)

159. Костецкий, Б.И.: Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техника (1970)
160. Крагельский, И.В., Добычин, М.Н., Комбалов, В.С.: Основы расчета на трение и износ. М.: Машиностроение (1977)
161. Крагельский, И.В.: Трение и износ. М.: Машиностроение (1969)
162. Красовский, А.Я., Красико, В.Н.: Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. К.: Наукова думка (1990)
163. Кудрявцев, И.В., Грудская Р.Е.: Новые способы поверхностного пластического деформирования. Машиностроитель. 7, 28-29 (1984)
164. Кузін, О.А., Кусий, Я.М., Топільницький, В.Г.: Вплив технологічної спадковості на параметри надійності виробів. Технологічний аудит і резерви виробництва. 1, 1 (21), 15-21 (2015). doi: 10.15587/2312-8372.2015.37678
165. Кузнецов, А.М.: Технологические и физические основы деформирующих методов обработки. Автомобильная про мышленность. 12, 36-37 (1974)
166. Кузнецов, Ю.М., Луців, І.В., Дубиняк, С.А.: Теорія технічних систем. К.-Тернопіль: ТДТУ (1998)
167. Кузьо, І.В., Гурський, В.М., Шпак, Я.В.: Вибір критеріїв оптимізації та пружносилових параметрів віброударних резонансних машин. Вібрації в техніці та технологіях. 3, 28-37 (2015)
168. Кузьо, І.В., Ланець, О.С., Гурський, В.М.: Оптимізаційний синтез полічастотних вібраційних систем з імпульсним електромагнітним приводом. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 47, 3-12 (2013)
169. Курбатов, Ю.Е., Кашеварова, Г.Г.: Поврежденность как основная мера усталостного разрушения. Международный научно-исследовательский журнал. 5 (47), 3, 126-133 (2016)
170. Кусий, Я., Кузін, О., Топільницький, В.: Вплив умов отримання виливків на формування технологічних пошкоджень. В: 12-ий Міжнародний симпозиум

- українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозиуму. pp 115-116. КІНПАТРИ ЛТД, Львів (2015)
171. Кусий, Я., Кук, А., Арендар, Л.: Вплив режимів вібраційно-відцентрового зміцнення на геометричні параметри якості поверхні нежорстких циліндричних деталей. В: 9-ий Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозиуму. pp 194-196. КІНПАТРИ ЛТД, Львів (2009)
172. Кусий, Я.М., Королюк, А.М., Романюк, М.А., Ляшеник, І.Т.: Застосування вібраційних технологій для забезпечення параметрів якості виробів. В: «Перспективи розвитку сучасної науки та освіти»: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. pp 23-25. Львів (2019)
173. Кусий, Я.М., Королюк, А.М.: Вибір раціонального маршруту оброблення виливок за допомогою методу LM-твердості. В: «Пріоритети сучасної науки»: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. pp 30-33, Київ (2019)
174. Кусий, Я.М., Кузін, О.А., Винар, В.А, Рацька, Н.Б.: Використання методу LM - твердості для визначення технологічної пошкоджуваності виливків. В: «Прогресивні технології в машинобудуванні»: Збірник наукових праць VII Міжнародної науково-практичної конференції. pp 72-75. Львів (2018)
175. Кусий, Я.М., Кузін, О.А., Кузін, М.О.: Вплив технологічного маршруту оброблення на формування міжзеренної пошкоджуваності виливків. Східно-європейський журнал передових технологій. 1, 5 (79), 39-47 (2016). doi: 10.15587/1729-4061.2016.59845
176. 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: Збірник наукових праць Всеукраїнської науково-технічної конференції. pp 57-60, Львів/Карпати (2016)

177. Кусий, Я.М., Кузін, О.А., Топільницький, В.Г.: Оцінка пошкоджуваності заготовок після лиття в піщані форми. В: 13-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозиуму. pp 160-161. КІНПАТРИ ЛТД, Львів (2017)
178. Кусий, Я.М., Кузін, О.А.: Оцінка технологічної пошкоджуваності виливків за параметрами розсіювання характеристик твердості. В: «Прогресивні технології в машинобудуванні»: Збірник наукових праць VI Міжнародної наук.-практ. конф. pp 62-65. Львів (2017)
179. Кусий, Я.М., Кузін, О.А.: Роль розміщення елементів конструкції у формуванні технологічних пошкоджень виливка. В: «Прогресивні технології у машинобудуванні»: Матеріали доповідей VIII Міжнародної наук.-техн. конф. pp 152-154. Івано-Франківськ (2019)
180. Кусий, Я.М., Кузін, О.А.: Роль структури литих заготовок у формуванні пошкодженості при механічній обробці. В: «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку»: Матеріали тринадцятої Міжнародної наук.-техн. конф. p 59. (2015)
181. Кусий, Я.М., Кук, А.М.: Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення для технологічного забезпечення безвідмовності деталей машин. Східно-Європейський журнал передових технологій. 1. 7(73), 41-51 (2015). doi: 10.15587/1729-4061.2015.36336
182. Кусий, Я.М., Кук, А.М.: Технологічне успадкування властивостей виробу на стадії створення його життєвого циклу. Системні технології. 4 (135) 119-134 (2021). doi: 10.34185/1562-9945-4-135-2021-13
183. 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. 1, 23-37, (2020)
184. Кусий, Я.М., Личак, О.В., Топільницький, В.Г.: Удосконалення структурної моделі життєвого циклу вибору із врахуванням технологічного успадкування параметрів матеріалу. В: «Теоретичні та прикладні аспекти

- розвитку науки»: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. pp 26-29. Київ (2020)
185. Кусий, Я.М., Личак, О.В.: Вплив елементів конструкції вилівка на еволюцію технологічних дефектів. Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. 24. 46-56 (2021). doi: 10.34185/1991-7848.2021.01.05
186. Кусий, Я.М., Ляшеник, І.Т.: Керування операцією вібраційно-відцентрового зміцнення з використанням SADT-технологій. В: «Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності»: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. pp 33-36. Львів (2019)
187. Кусий, Я.М., Погорілий Ю.О. Вібраційно-відцентрове зміцнення циліндрових втулок бурових pomp. В: «Сучасні технології у промисловому виробництві»: Матеріали VIII Всеукраїнської наук.-техн. конф. pp 46-47, Суми (2021)
188. Кусий, Я.М., Погорілий, Ю.О.: Технологічне успадковування властивостей виробів в умовах самоорганізації технічних систем. В: «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»: Матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. pp 301-304, Дніпро, Національна металургійна академія України (2021)
189. Кусий, Я.М., Погорілий, Ю.О.: Функціонально-орієнтоване проектування операцій при виготовленні виробів. В: «Development and implementation of technologies in production»: Abstracts of the V International Scientific and Practical Conference. pp 78-80. Leeuwarden, Netherlands (2021)
190. Кусий, Я.М., Ступницький, В.В., Кук, А.М., Топільницький, В.Г.: Розроблення концептуальної схеми формування раціональних параметрів якості у життєвому циклі машини. В: «Прогресивні технології в машинобудуванні» : Збірник наукових праць IX Міжнародної науково-практичної конференції. pp 107-110 Львів (2020)
191. Кусий, Я.М., Топільницький, В.Г., Василів, Х.Б., Широков, О.В.: Оцінка зміни рельєфу віброзміцнених втулок бурових pomp НБ32. В: «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в

- современных условиях: Материалы XII-ой Промышленной конференции с международным участием. pp 127-131. Плавья/Карпаты, Украина (2012)
192. Кусий, Я.М., Топільницький, В.Г., Василів, Х.Б.: Дослідження мікрорельєфу віброзміцнених втулок бурових помп. Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 713, 171-175 (2011)
193. Кусий, Я.М., Топільницький, В.Г.: Визначення раціонального припуску на оброблення поверхонь заготовки за критерієм технологічної пошкоджуваності. Вісник Нац. техн. ун-ту «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 1 (7), 24-33 (2021). doi: 10.20998/2413-4295.2021.01.04
194. Кусий, Я.М., Топільницький, В.Г.: Вібраційно-відцентрове зміцнення деталей нафтогазовидобувного обладнання. В: «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу»: Матеріали II Міжнародної наук.-техн. конф. pp 327. Івано-Франківськ (2018)
195. Кусий, Я.М., Топільницький, В.Г.: Дослідження впливу режимів вібраційно-відцентрового зміцнення на геометричні параметри якості поверхні довгомірних циліндричних деталей. Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні. 43, 44-51 (2009)
196. 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». 772, 196-201 (2013)
197. 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». 746, 172-175 (2012)
198. 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». 613, 100-107 (2008)

199. Кусий, Я.М., Чернишенко, Я.В.: Проектування функціонально-орієнтованих технологічних процесів з використанням SADТ-технологій. В: «Priority directions of science and technology development»: Abstracts of the 4th International scientific and practical conference. pp 426-432, Kyiv (2020)
200. Кусий, Я.М.: Аналіз закономірностей технологічного успадкування при виготовленні виробів. В: «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти»: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. pp 61-63, Львів (2020)
201. 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. 2, 14-22 (2020). doi:10.20998/2413-4295.2020.02.02
202. Кусий, Я.М.: Контроль показників для оцінки довговічності деталей. В: «Прогресивні технології в машинобудуванні»: Збірник наукових праць III-ьої Всеукраїнської науково-технічної конференції. pp 60-62. Львів/Карпати, (2015)
203. Кусий, Я.М.: Оптимізація маршруту оброблення поверхонь заготовки за критерієм однорідності структури матеріалу. Системні технології. 1(132), 76-91 (2021). doi: 10.34185/1562-9945-1-132-2021-06
204. Кусий, Я.М.: Технологічне успадкування властивостей при забезпеченні параметрів якості виробу в процесі його виготовлення. Системні технології. 5 (124), 171-184 (2019). doi: 10.34185/1562-9945-5-124-2019-16
205. Ланець, О.С., Гурський, В.М., Шпак, Я.В.: Особливості застосування САD/САЕ програм для проектування та аналізу автоматизованого обладнання. Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”. 746, 6– 13 (2012)
206. Ланець, О.С., Шпак, Я.В., Шоловій, Ю.П.: Міжрезонансні вібраційні притиральні машини з електромагнітним приводом, розроблені на основі ефекту “нульової жорсткості”. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 41, 41-48 (2007)

207. Ланець, О.С.: Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення). Львів, Видавництво Національного університету «Львівська політехніка» (2008)
208. Лебедев, А.А., Ламашевский, В.П., Музыка, Н.Р. и др.: Кинетика накопления рассеянных повреждений в поликристаллических материалах с разным размером зерна при малых деформациях. Проблемы прочности. 5, 32-44 (2011)
209. Лебедев, А.А., Маковецкий, И.В., Музыка, Н.Р. и др.: Оценка поврежденности материала по рассеиванию характеристик упругости и статической прочности. Пробл. прочности. 2, 5-14 (2006)
210. Лебедев, А.А., Музыка, Н. Р., Волчек, Н. Л.: Метод диагностики состояния материала по параметрам рассеяния характеристик твердости. Завод. лаб. 12, 49-51 (2003)
211. Лебедев, А.А., Музыка, Н.Р., Волчек, Н.Л.: Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости. Проблемы прочности. 4, 5-11 (2002)
212. Лебедев, А.А., Чаусов, Н.Г.: Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины (2004)
213. Лебедев, А.В.: Проблема нетранзитивности для трех непрерывных случайных величин. Автомат. и телемех. 6, 91-103 (2019). doi: 10.1134/s0005231019060059
214. Левин, В.А., Морозов, Е.М., Матвиенко, Ю.Г.: Избранные нелинейные задачи механики разрушения. М.: Физматлит (2004).
215. Леонов, А.А., Корчмит, Ю.В., Азаренко, Е.И.: Оценка безопасности режущего інструмента при анализе риска технологических операций лезвийной обработки. Вісник СевДТУ. 97, 196-200 (2008)
216. Литвиняк, Я., Литвиняк, Г.: Підвищення довговічності інструментів для динамічного зміцнення деталей машин. Вісник Державного університету

- «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 394, 19-22 (2000)
217. Литвиняк, Я.: Методика вибору раціональних параметрів циліндричних щггок з ударними елементами та оптимальних режимів поверхневої обробки. Вісник Державного університету «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 359, 53-58 (1999)
218. Ляшук, О.Л., Клендій, В.М., Третьяков, О.Л., О.Л. Дмитренко, О.Л.: Обґрунтування конструкції гвинтового робочого органу екструдера. В: «Актуальні задачі сучасних технологій»: збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. рр. 171-172. Т.: ТНТУ (2015)
219. Мазур, М.П. Гордєєв, А.І., Кармаліта, А.К.: Експериментальне дослідження динамічних характеристик та визначення оптимальних режимів роботи вібраційного обладнання для нанесення мастило утримуючих лунок. Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». 5, 17-23 (2014)
220. Марковец, М.П.: Определение механических свойств материалов по твердости. М.: Машиностроение (1979)
221. Марчук, В.І., Марчук, І.В., Джугурян Т.Г.: Технологічне забезпечення точності та якості поверхонь обертання в підшипниковому виробництві. Міжвузівський збірник «Перспективні технології та прилади». 12, 111-118 (2018)
222. Марчук, В.І., Марчук, І.В.: Забезпечення точності формоутворення в технологічних системах шліфування поверхонь обертання. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 60, 161-165 (2017)
223. Масло, О. М.: Пошкоджуваність і граничний стан металевих матеріалів в умовах пластичного деформування при різних видах механічного навантаження. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних

- наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. Київ (2021)
224. Маталин, А.А.: Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машгиз (1956)
225. Маталин, А.А.: Новые направления развития технологии чистовой обработки. Киев: Техніка (1972)
226. Маталин, А.А.: Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев: Техніка (1971)
227. Матюнин, В.М.: Методы и средства безобразцовой экспресс-оценки механических свойств конструкционных материалов. М.: Изд. МЭИ (2001)
228. Махутов, Н.А., Зацаринный, В.В., Альгин, В.Б., Ишин Н.Н.: Техногенный риск, надежность и диагностика технических систем: подходы, модели, методы. Механика машин, механизмов и материалов. 3(20)–4(21), 67-85 (2012)
229. Мелень, Р.В., Козунь В.І.: Метод оцінки ефективності комплексної системи контролю правильності функціонування телекомунікаційних систем бездротового зв'язку. В: «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»: Тези доповідей ІХ Міжнародної науково-практичної конференції [Електронний ресурс]. рр. 49-50. Запоріжжя : ЗНТУ (2018)
230. Митрофанов, С.П., Куликов, Д.Д., Миляев, О.Н., Падун Б.С.: Технологическая подготовка гибких производственных систем. Л.: Машиностроение (1987)
231. Митрофанов, С.П.: Научные основы организации группового производства. М.-Л.: Машгиз (1963)
232. Михайлов, А.Н., Настасенко, В.А., Проценко, В.А.: Усовершенствование принципов функционально-ориентированных технологий при проектировании и производстве объектов техники. Вісник Хмельницького нац.ун-ту. 3, 38-45 (2011)

233. Михайлов, А.Н.: Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. Донецк: ДонНТУ (2009)
234. Музыка, Н.Р., Швец, В.П.: Определение напряжений и деформаций в деформированном упругопластическом материале по характеристикам твердости. Пробл. прочности. 4, 84-91 (2014)
235. Музыка, Н.Р.: Исследование накопления повреждений в листовом материале при сложном напряженном состоянии. Пробл. прочности. 5, 49-53 (2013)
236. Нагоркин, М.Н.: Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов. Монография. М. : Издательский дом «Спектр» (2017)
237. Наумов, С.Л.: Исследование сопротивления металлов абразивному изнашиванию. К: Редиздат КИГВФ (1960).
238. Никитенков, Н.Н., Никитенкова, Н.А.: Синергетика для инженеров: учебное пособие. Томск: Изд.-во Томского политехнического университета (2009)
239. Никифоров, А.Д., Ковшов, А.Н., Назаров, Ю.Ф., Схиртладзе, А.Г.: Высокие технологии размерной обработки в машиностроении: Учебник для вузов. М.: Высш. шк. (2007)
240. Огородников, В.А., Деревенько, И.А., Алиева, Л.И.: Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении: монография. Вінниця: ВНТУ (2015)
241. Огородніков, В.А., Кириця, І.Ю., Перлов, В.Є.: Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором: монографія. Вінниця: ВНТУ (2015)
242. Одинцов, Л.Г.: Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение (1987)
243. Одинцов, Л.Г.: Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение (1981)

244. Олейник, Н.В., Кычин, В.П., Луговской, В.П.: Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. К.: Техніка (1984)
245. Пантелеенко, Ф.И., Лялякин, В.П., Иванов, В.П., Константинов, В.М.: Восстановление деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение, (2003)
246. Папшев, Д. Д.: Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение (1978)
247. Пасічник, В.А.: Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ (2009)
248. Пасько, Н.И., Анцев, А.В., Анцева, Н.В., Сальников, С.В.: Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение. Тула: Изд-во ТулГУ, (2016)
249. Пермяков, О.А., Клочко, О.О., Веселовська Н.Р., Синиця, Ю.О.: Технологічне забезпечення підвищення параметрів точності та якості зубчастих рейок важких верстатів з ЧПК. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія “Технології в машинобудуванні”. 6, 72-77 (2018)
250. Петраков, Ю.В.: 3-D моделирование для САМ-систем / Ю.В.Петраков. Вісник СевНТУ. Серія: Машино-приладобудування та транспорт. 118, 119-125 (2011)
251. Петраков, Ю.В.: Нова концепція автоматизованого проектування програм для верстатів з ЧПУ. Прогресивні технології і системи машинобудування. 42, 238-245 (2011)
252. Петраков, Ю.В.: Пути развития интегрированных САД/САМ-систем в машиностроении. Вісник Національного техн. ун-ту «ХПІ». Серія: Сучасні технології в машинобудуванні. 3, 160-167 (2009)
253. Петраков, Ю.В.: Развитие САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ. Київ: Січкап (2011).

254. Пилипець, М.І., Васильків, В.В., Радик, Д.Л., Пилипець, О.М.: Передумови розроблення комбінованих операцій виготовлення гвинтових і шнекових заготовок методом обробки металів тиском. Перспективні технології та прилади. 18, 112-123 (2021). doi: 10.36910/6775-2313-5352-2021-18-17
255. Писаренко, Г.С., Лебедев А.А.: Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. К.: Наукова думка (1976)
256. Половко, А.М., Гуров, С.В.: Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург (2006)
257. Посвятенко, Е.К., Посвятенко, Н.І., Мельник, Т.В.: Матеріали у CVD-технологіях інженерії поверхні деталей засобів транспорту. Вісник Національного транспортного університету. 42, 210–217 (2018)
258. Проников, А. С.: Надежность машин. М.: Машиностроение (1978)
259. Проников, А.С.: Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана (2002)
260. Проскуряков, Ю.Г.: Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. М.: Машиностроение (1971)
261. Работнов, Ю.Н.: Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука (1977)
262. Работнов, Ю.Н.: Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука (1975)
263. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник / Под общ. ред. К.М. Великанова. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение (1990)
264. Решетов, Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. М. : Высш. школа (1983)
265. Рудзит, Я.А.: Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне (1975)
266. Рыжов, Э.В., Горленко, О.А.: Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами поверхностей. Тула : ТулПИ (1980)

267. Рыжов, Э.В., Колесников, Ю.В., Суслов, А.Г.: Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. Киев, Наук. думка (1982)
268. Рыжов, Э.В., Суслов А.Г., Улашкин А.П.: Комплексный параметр для оценки свойств поверхностей трения деталей машин. Трение и износ. 1 (3), 436-439 (1980)
269. Рыжов, Э.В., Суслов А.Г., Фёдоров В.П.: Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение (1979)
270. Рыжов, Э.В.: Научные основы технологического управления качеством поверхности деталей при механической обработке. Трение и износ. 18 (3), 293-300 (1997)
271. Серник, Н.М., Кантор, М.М.: Влияние термической обработки на износостойкость стали в грунтовой массе. Металловедение и термическая обработка металлов. 7, 46-49 (1958)
272. Синопальников, В.А., Григорьев С.Н.: Надежность и диагностика технологических систем: Учебник. М.: Высш. шк. (2005)
273. Смелянский, В.М.: Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение (2002)
274. Смирнов-Аляев, Г.А.: Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972.
275. Соколовский, А.П.: Жесткость в технологии машиностроения. М. ; Л. МТМ. Гос. научно-техн. изд-во машиностроит. лит. (1946)
276. Сосновский, Л., Щербаков С. Концепции поврежденности материалов. Вісник ТНТУ. Спецвипуск (част. 1), 14-23 (2011)
277. Сосновский, Л.А., Махутов, Н.А., Бордовский, А.М., Воробьев, В.В.: Статистическая оценка деградации свойств материала нефтепровода. Завод. лаб. 11, 40-49 (2008)
278. Сосновский, Л.А., Воробьев, В.В.: Влияние длительной эксплуатации на сопротивление усталости трубной стали. Пробл. прочности. 6, 44-53 (2000)
279. Ступницький, В.В.: Науково-прикладні основи проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудування засобами

- паралельного інжинірингу. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування, Національний університет “Львівська політехніка”, Львів (2015)
280. Ступницький, В.В.: Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу. Вісник Донецького національного техн. ун-ту «Прогресивні технології і системи машинобудування. 2 (46), 249-256 (2013)
281. Ступницький, В.В.: Структура та функції системи автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва на основі концепції функціонально-орієнтованого проектування операцій. Міжнародний науковий журнал «Технологічні комплекси». 2(8), 65-71 (2013)
282. Сулима, А.М., Шулов, В.А., Ягодкин Ю.Д.: Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение (1988)
283. Суслов, А. Г., Федоров, В.П., Горленко, О.А. и др.: Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений. М. : Машиностроение (2006)
284. Суслов, А. Г.: Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение (2000).
285. Суслов, А.Г., Базров, Б.М., Безъязычный, В.Ф.: Научные основы технологий в машиностроении. М.: Машиностроение (2012)
286. Суслов, А.Г., Безъязычный, В.Ф., Панфилов Ю.В., Бишутин, С.Г. и др.: Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение (2008).
287. Суслов, А.Г., Дальский, А.М.: Научные основы технологии машиностроения (2002)
288. Суслов, А.Г.: Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение (1987)
289. Суслов, А.Г.: Технология машиностроения: Учебник для студентов м/с специальностей вузов. М.: Машиностроение (2007)

290. Технический контроль в машиностроении: Справочник проектировщика / Под общ. ред. В.Н. Чупырина, А.Д. Никифорова. М.: Машиностроение (1987)
291. Тигарев, В.М., Тонконогий, В.М., Вайсман, В.О., Бабіч, Ю.І., Салій, В.І.: Розробка технології та порівняльний аналіз створення тривимірних моделей в середовищі сучасних САПР з урахуванням процесів формоутворення різанням. Різання та інструмент в технологічних системах. 90, 85-99, (2019)
292. Ткачев, В.Н.: Износ и повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. М.: Машиностроение (1964).
293. Травин, В.Ю.: Оценка поврежденности материала при расчете прочности и долговечности элементов корпусных конструкций. Известия ТулГУ, Технические науки. 10 (1), 128-132 (2014)
294. Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. М.: Машиностроение (1993)
295. Федосов, С.А., Пешек, Л.: Определение механических свойств материалов микроиндентированием (современные зарубежные методики – обзор). М.: МГУ (2004)
296. Фельдман, Я.С.: Расчет параметров микрорельефа цилиндрических вибронакатанных поверхностей деталей машин, приборов и их технологическое обеспечение. Под ред. Ю.Г. Шнейдера. Л.: ЛИТМО, (1979)
297. Фролов, С.А., Кравченко, С.І., Попов, С.В., Гнітько, С.М.: Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія. Полтава: Технол. центр (2019)
298. Хакен, Г.: Синергетика. М.: Мир (1980)
299. Хакен, Г.: Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системам. М.: Мир (1985)
300. Хворостухин, Л.А., Шишкин, С.В., Ковалев, А.П., Ишмаков, Р.А.: Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. М.: Машиностроение (1988)

301. Хрущов, М.М., Бабичев, М.А.: Абразивное изнашивание. М.: Наука (1970)
302. Хульт, Я.: Поврежденность и распространение трещин. В кн.: Механика деформируемых твердых тел: Направления развития. Сб. статей /Пер. с англ. pp 230-243 М.: Мир (1983)
303. Цейтлин, В.Г.: Метрологическое обеспечение качества продукции. М.: Изд.-во стандартов (1988)
304. Ціж, А.С., Кусий, Я.М.: Оптимізація маршруту оброблення поверхонь заготовки за допомогою критерію технологічної пошкоджуваності матеріалу. В: «Сучасний стан та перспективи розвитку науки»: Матеріали міжнародної студентської наукової конференції. pp. 68-74. Ужгород (2020)
305. Швець, В.П., Музика М.Р., Маковецький І.В. та ін.: Контроль поточного стану металу стрілкового переводу в процесі напрацювання. Проблеми прочності. 1, 104-108 (2011)
306. 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. В: «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях»: Материалы X-ой Промышленной конференции с международным участием. pp 243-246, Славское, Украина (2010)
307. Шнейдер, Ю.Г.: Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л. : Машиностроение (1972)
308. Шнейдер, Ю.Г.: Технология финишной обработки давлением: справочник. СПб : Политехника (1998)
309. Шнейдер, Ю.Г.: Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние (1982)
310. Шульженко, М.Г., Гонтаровський, М.П., Матюхін, Ю.І., Пожидаєв, О.В.: Методологія розрахункової оцінки індивідуального ресурсу парових турбін


- ТЕС і ТЕЦ. Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій». Збірник наукових статей з результатами, отриманими в 2007–2008 рр. 682-686 (2009)
311. Щигель, В.А.: Расчет продолжительности процесса виброобработки по обобщенным критериям. Автоматизация производственных процессов. 15, 50-56 (1976)
312. Эбелинг, В.: Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур. М.: Мир (1979)
313. Яковина, В.С., Федасюк, Д.В., Сенів, М.М., Нитребич, О.О.: Моделі, методи та засоби аналізу надійності програмних систем : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки (2015)
314. Яковина, В.С.: Моделювання параметра потоку відмов програмного забезпечення та визначення діапазонів показника його складності. Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі». 806, 296-302 (2014)
315. Ямалеев, К.М., Абраменко, Л.А.: Деформационное старение сталей в процессе эксплуатации магистральных нефтепроводов. Пробл. прочности. 11, 125-128 (1989)
316. Ящерицын, П.И., Борисенко, А.В., Дривотин, И.Г., Лебедев, В.Я.: Ротационное резание материалов. Мн.: Наука и техника (1987)
317. Ящерицын, П.И., Зайцев, А.Г., Барботько, А.И.: Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. Мн.: Наука и техника (1976)
318. Ящерицын, П.И., Минаков, А.П.: Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении. Мн: Наука и техника (1986)
319. Ящерицын, П.И., Рыжов, Э.В., Аверченков, В.И.: Технологическая наследственность в машиностроении. Мн.: Наука и техника (1977)
320. Ящерицын, П.И., Хейфец, М.Л., Чемисов, Б.П. и др.: Технологические основы высокоэффективных методов обработки деталей. Новополоцк: ПГУ (1996)


ДОДАТКИ

Додаток А

Акти впровадження результатів наукових досліджень

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з наукової роботи
 Національного університету «Львівська
 політехніка»
 проф.  Демидов І.В.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
 докторанта Кусого Ярослава Маркіяновича
 «Науково-прикладні основи технологічного успадкування параметрів якості
 для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів»
 під час виконання науково-дослідних робіт
 у Національному університеті «Львівська політехніка»

Комісія у складі

голова комісії

Небесний Р.В. – д.т.н., ст. досл., начальник науково-дослідної частини;

члени комісії:

Ступницький В.В. – д.т.н., доц., завідувач кафедри «Робототехніка та інтегровані технології машинобудування»;

Лазько Г.В. – к.т.н., завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень;

Чулой Т.М. – начальник планово-фінансової групи,

цим актом підтверджує те, що результати дисертаційної роботи докторанта Кусого Я.М. використано під час виконання науково-дослідних робіт:

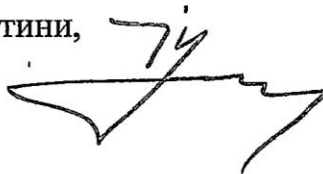
– «Розроблення методів вібраційного поверхневого оброблення виробів та керування віброактивністю технологічних машин» (Договір № М/178-2006р., № державної реєстрації 0106U008813). Зокрема: модернізовані резонансні машини для об'ємного вібраційного оброблення виробів; конструкторське рішення технологічного обладнання та технологічного оснащення для вібраційно-відцентрового оброблення виробів; методика визначення раціональних технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнення деталей машин для забезпечення їх регламентованих параметрів їх якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності; експериментальні дослідження реалізованих резонансних систем.

– «Дослідження впливу вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри якості та показники надійності виробів» (№ державної реєстрації 0118U007055). Зокрема: конструкторське рішення технологічного оснащення для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь виробів у машинах об'ємного вібраційного оброблення; синтез і оптимізація структури технологічного процесу виготовлення втулок циліндрових бурових pomp НБ32 при застосуванні принципу функціонально-орієнтованого проектування; оптимальні технологічні параметри викінчувально-зміцнювальних операцій виготовлення машинобудівних виробів при застосуванні методу вібраційно-відцентрового зміцнення для забезпечення їх експлуатаційних характеристик і показників надійності; експериментальні дослідження реалізованих резонансних систем.

– «Дослідження динамічних процесів вібраційних технологічних систем» (№ державної реєстрації 0117U004472). Зокрема, комплекс для контролю параметрів мікрорельєфу поверхонь деталей машин; раціональні технологічні режими вібраційного оброблення деталей машин для забезпечення регламентованих параметрів їх якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності; експериментальні дослідження реалізованих резонансних систем.

Голова комісії:

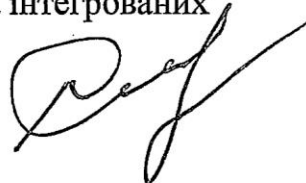
начальник науково-дослідної частини,
д.т.н., ст. досл.



Небесний Р.В.

Члени комісії:

завідувач кафедри робототехніки та інтегрованих
технологій машинобудування,
д.т.н., доц.



Ступницький В.В.

завідувач відділу науково-організаційного супроводу
наукових досліджень, к.т.н.



Лазько Г.В.

/ начальник планово-фінансової групи



Чулой Т.М.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної
 роботи Національного університету
 «Львівська політехніка»



Давидчак О.Р.

про використання результатів дисертаційної роботи
 докторанта Кусого Ярослава Маркіяновича

«Науково-прикладні основи технологічного успадкування параметрів
 якості для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів» у
 навчальному процесі кафедри робототехніки та інтегрованих технологій
 машинобудування Національного університету «Львівська політехніка»

Комісія у складі

голова комісії

Ланець О.С. – д.т.н., проф., директор Інституту механічної
 інженерії та транспорту;

члени комісії:

Ступницький В.В. – д.т.н., доц., завідувач кафедри «Робототехніка
 та інтегровані технології машинобудування»;

Дмитрів В.Т. – д.т.н., доц., проф. кафедри «Робототехніка та
 інтегровані технології машинобудування»;

цим актом підтверджує те, що в навчальному процесі кафедри «Робототехніка
 та інтегровані технології машинобудування» впроваджено та використовуються
 наступні результати дисертаційної роботи Кусого Я.М.:

– розрахункові програми, алгоритми реалізації принципу
 функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів
 оброблення деталей машин, прикладні задачі уточненого вибору (оптимізації)
 технологічних параметрів викінчувально-зміцнювальних операцій
 виготовлення машинобудівних виробів при застосуванні методу вібраційно-
 відцентрового зміцнення для забезпечення їх експлуатаційних характеристик і
 показників надійності під час проведення практичних занять з курсу
 «Технологічне забезпечення надійності деталей машин»;

– методику моделювання показників надійності елементів технологічної системи: верстат-пристрій-інструмент-заготовка на визначеній технологічній операції при виготовленні деталей основного технологічного обладнання для забезпечення параметрів їх якості та експлуатаційних характеристик під час проведення лекційних і практичних занять з курсу «Металорізальні верстати».

Під час підготовки магістрів спеціалізації кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування використовується методика встановлення методів оброблення поверхонь деталей машин за розсіюванням механічних характеристик їх матеріалу при використанні методу LM-твердості та програмне забезпечення для розрахунку коефіцієнтів однорідності Вейбулла (m). Отримані результати сприяють усвідомленню студентами важливості завдань синтезу та оптимізації структури технологічних процесів виготовлення виробів. Застосування результатів дисертаційних досліджень розширює кругозір, підвищує теоретичний рівень та практичні навички магістрів при плануванні та реалізації експериментальних досліджень, у використанні прикладних розрахункових методів у сучасних програмних засобах.

Голова комісії:

Директор Інституту механічної інженерії та транспорту, д.т.н., проф.



Ланець

Ланець О.С.

Члени комісії:

Завідувач кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування,
д.т.н., доц.



Ступницький В.В.

Професор кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування,
д.т.н., доц.



Дмитрів В.Т.



АКТ

про результати випробувань
втулок циліндрових бурових насосів НБ-32

Ми, що нижче підписалися, представник ТП “Техноресурс” – головний технолог Федішин В.М. та представник Калуської НГРС ДП «Укрзахідгеологія» головний механік Гоц В.П., склали цей акт про результати випробувань циліндрових втулок бурових насосів НБ-32:

було проведено дослідно-промислові випробування циліндрових втулок бурових насосів НБ-32, виготовлених із сталі 20 ГОСТ 1050-74. На оздоблювально-викінчувальній технологічній операції при виготовленні циліндрових втулок бурових насосів НБ-32 здійснено вібраційно-відцентрове зміцнення у Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі «Технологія машинобудування».

Застосування вібраційно-відцентрового зміцнення у ТП виготовлення циліндрових втулок бурових насосів НБ-32 дозволило при збереженні вимог нормативної документації забезпечити експлуатаційний ресурс не менший, ніж у базових втулок, виготовлених із сталі 70 ГОСТ 1050-74, зокрема, під час проведених випробувань ресурс базових втулок із сталі 70 - 420 год, віброзміцнених втулок із сталі 20 - 752 год. Крім цього, використання віброційно-відцентрового зміцнення сприяло зменшенню загальної працемісткості механічного оброблення та собівартості виготовлення виробу.

Акт складений у трьох примірниках.

Головний технолог
ТП “Техноресурс”

Федішин В.М.

Головний механік
Калуської НГРС
ДП “Укрзахідгеологія”

Гоц В.П.



АКТ

про впровадження наукових і прикладних результатів

докторської дисертаційної роботи

КУСОГО ЯРОСЛАВА МАРКІЯНОВИЧА

на тему: «НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСПАДКУВАННЯ
ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВИРОБІВ»

Комісія у складі голова – Рожко В.Д., члени комісії: Шелкаєв Є.Ф., Бобиляк Я.Ф. склала цей акт про те, що практичні результати дисертаційної роботи КУСОГО ЯРОСЛАВА МАРКІЯНОВИЧА «Науково-прикладні основи технологічного успадкування параметрів якості для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів» впроваджені у виробничий процес ТзОВ «Транссистем» у наступному вигляді:

1. Програмне забезпечення для оптимізації структури технологічних операцій зокрема та технологічних процесів виготовлення виробів загалом із врахуванням впливу елементів технологічного середовища: металорізальний верстат-верстатний пристрій-металорізальний інструмент на забезпечення регламентованих параметрів якості деталей машин із урахуванням умов їх потенційного використання.

2. Методика моделювання показників надійності елементів технологічної системи: металорізальний верстат-верстатний пристрій-металорізальний інструмент-заготовка на визначеній технологічній операції при виготовленні виробу для забезпечення параметрів його якості та експлуатаційних характеристик.

3. Методика встановлення методів оброблення поверхонь за розсіюванням механічних характеристик матеріалу заготовки деталі при використанні методу LM-твердості та програмне забезпечення для розрахунку параметрів матеріалу виробу.

Використання результатів дисертаційної роботи дозволило: скоротити витрати на розроблення проектної документації на 10-12 %, підвищити продуктивність праці при обробленні деталей машин на 8-12 %.

Голова комісії,
Директор ТзОВ «Транссистем»

Рожко В.Д.

Члени комісії,
Головний інженер ТзОВ «Транссистем»
Начальник виробництва
ТзОВ «Транссистем»

Шелкаєв Є.Ф.

Бобиляк Я.Ф.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Головний інженер ТзОВ «ІнтерПЕТ»
 Яворський В.З.
 «04» червня 2021 р.

АКТ

**про впровадження наукових і прикладних результатів дисертаційної роботи
 КУСОГО ЯРОСЛАВА МАРКІЯНОВИЧА
 на тему: «НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСПАДКУВАННЯ
 ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ
 ХАРАКТЕРИСТИК ВИРОБІВ»**

Комісія у складі головного інженера ТзОВ «ІнтерПЕТ» Яворського В.З., головного конструктора Данай В.А., провідного технолога Головецького М.П. встановила використання наукових і прикладних результатів дисертаційної роботи КУСОГО ЯРОСЛАВА МАРКІЯНОВИЧА при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей транспортних машин, що є об'єктами виробництва ТзОВ «ІнтерПЕТ».

Об'єктами впровадження є:

1. Пропозиції стосовно оптимізації технологічного процесу механічного оброблення кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 із урахуванням умов його потенційного використання.
2. Методика визначення кількості методів оброблення для технологічного маршруту оброблення поверхонь машинобудівного виробу за розсіюванням характеристик твердості його матеріалу.
3. Використання адаптованого програмного забезпечення для розрахунку коефіцієнтів однорідності Вейбулла (m) матеріалу виробу, автором якого є Кусий Я.М.

Голова комісії,
 Головний інженер ТзОВ «ІнтерПЕТ»

Яворський В.З.

Члени комісії,
 Головний конструктор ТзОВ «ІнтерПЕТ»
 Провідний технолог ТзОВ «ІнтерПЕТ»

Данай В.А.

Головецький М.П.



Характеристика основних категорій машин при забезпеченні основних вимог до їх технічних характеристик

| Категорія машин | Приклади машин | Життєвий цикл виробу | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|--|----|--------|-----------------------------|
| | | Стадія створення | | Стадія експлуатації | | | |
| | | Службове призначення | Основні вимоги | Характер роботи | ТО | ремонт | Оцінювання безвідмовності |
| Космічна техніка | Штучні супутники, космічні зонди | Дослідна робота у космосі | Якість продукції; продуктивність; безпека; екологія | Періодична або постійна робота з допустимими зупинками | + | + | Міжремонтний період |
| Енергетичні | Електродвигуни; двигуни внутрішнього згоряння; турбіни; атомні реактори тощо | Взаємоперетворення видів енергії | ККД; потужність; безпека; екологія | Періодична | - | (+) | Необхідна тривалість роботи |
| Транспортні | Автомобільний, авіаційний, залізнодорожний і водний транспорт; підіймально-транспортні машини | Переміщення об'єкту | Швидкість; безпека; екологія; точність позиціонування; вантажопідйомність | Періодична | - | (+) | Необхідна тривалість роботи |
| Технологічні | Верстати, преси, прокатні стани, поліграфічні, текстильні машини тощо | Зміна форми, розмірів, стану та властивостей технічного об'єкту | Якість продукції; продуктивність; екологія | Періодична або постійна робота з допустимими зупинками | + | + | Міжремонтний період |
| Хіміко-технологічні | Обладнання хімічних і переробно-харчових виробництв | Отримання нових матеріалів і продуктів | Якість продукції; продуктивність; безпека; екологія | Періодична або постійна робота з допустимими зупинками | + | + | Міжремонтний період |
| Сільсько-господарські | Трактори; комбайни; косарки; жатки тощо | Технологічне забезпечення життєвого циклу рослин | Якість продукції; продуктивність; екологія | Сезонна робота | - | + | Тривалість сезону |

Продовження дод. Б1

| Категорія машин | Приклади машин | Життєвий цикл виробу | | | | | |
|---------------------------------|---|---|--|--|-----|--------|-----------------------------|
| | | Стадія створення | | Стадія експлуатації | | | |
| | | Службове призначення | Основні вимоги | Характер роботи | ТО | ремонт | Оцінювання безвідмовності |
| Гірничодобувні та збагачувальні | Бурові установки; подрібнювальне обладнання; промивальні машини | Добування та переробка корисних копалин | Продуктивність; безпека; екологія | Періодична | - | - | Необхідна тривалість роботи |
| Контрольні та випробувальні | Контрольно-вимірювальні, дослідні, діагностичні агрегатні | Оцінювання параметрів об'єкту | Точність; швидкість оцінювання | Періодична | - | - | Необхідна тривалість роботи |
| Військові | Гармати; танки; військова авіація тощо | Ураження об'єкту | Точність, вчасність і якість виконання бойового завдання | Періодична | - | - | Необхідна тривалість роботи |
| Медичні | Штучні органи (нирки, серце); медичні апарати | Відновлення здоров'я людини | Точність функціонування; безвідмовність; безпека | Періодична або постійна робота з допустимими зупинками | + | + | Міжремонтний період |
| Інтелектувальні | Електронно-обчислювальні; цифрові машини; аналогові машини | Розв'язання математичних завдань | Правильність обчислень | Неперіодична | + | + | Необхідна тривалість роботи |
| Розважальні | Ігрові автомати | Забезпечення дозвілля людей | Естетичність; безпека | Неперіодична | (+) | - | |

Забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності для основних категорій машин

| Категорія машин | Приклади машин | Забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності | | | | Критерій виходу виробу з ладу |
|---------------------|---|--|--------------------|-------------------------------------|------------------|--|
| | | Традиційне проектування | | Нові методи аналізу та проектування | | |
| | | Температурний діапазон t, °С | Довговічність, год | Кількість циклів N, циклів | Ресурс τ, год | |
| Космічна техніка | Штучні супутники, космічні зонди | -270 – +1000 | 0,028 – 40 | $10^0 – 10^4$ | $10^{-2} – 10^3$ | Пошкодження, відмова, аварія, катастрофа |
| Енергетичні | Електродвигуни; двигуни внутрішнього згорання; турбіни; атомні реактори тощо | | | | | |
| Транспортні | Авіаційний транспорт | | | | | |
| Військові | Гармати; танки; військова авіація тощо | | | | | |
| Транспортні | Автомобільний, залізнодорожний і водний транспорт; підйомально-транспортні машини | -60 – +600 | 10 – 100 | $10^5 – 10^7$ | $10^3 – 10^6$ | Пошкодження, відмова, аварія |
| Технологічні | Верстати, преси, прокатні стани, поліграфічні, текстильні машини тощо | | | | | |
| Хіміко-технологічні | Обладнання хімічних і переробно-харчових виробництв | | | | | |
| Транспортні | Автомобільний, авіаційний, залізнодорожний і водний транспорт; підйомально-транспортні машини | | | | | |
| Сільськогосподарні | Трактори, комбайни, сарни, жниварки | | | | | |

Продовження дод. Б2

| Категорія машин | Приклади машин | Забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності | | | | Критерій виходу виробу з ладу |
|----------------------------------|---|--|--------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------|
| | | Традиційне проектування | | Нові методи аналізу та проектування | | |
| | | Температурний діапазон t, °C | Довговічність, год | Кількість циклів N, циклів | Ресурс τ, год | |
| Гірничо-добувні та збагачувальні | Бурові установки; подрібнювальне обладнання; промивальні машини | -60 – +600 | 10 – 100 | $10^5 – 10^7$ | $10^3 – 10^6$ | Пошкодження, відмова, аварія |
| Контрольні та випробувальні | Контрольно-вимірювальні, дослідні, діагностичні агрегатні | | | | | |
| Медичні | Штучні органи (нирки, серце); медичні апарати | | | | | |
| Інтелектуальні | Електронно-обчислювальні; цифрові машини; аналогові машини | | | | | |
| Розважальні | Ігрові автомати | | | | | |

Додаток В

Регламентовані показники безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збережливості виробів

Додаток В1

Вибір номенклатури показників безвідмовності та ремонтпридатності або комплексних показників

| Класифікація виробів за ознаками, що визначають вибір показників надійності | | | | |
|---|---|--|--|---|
| Об'єкт | За режимом застосування (функціонування) | За можливістю відновлення та обслуговування | | |
| | | Відновлювані | | Невідновлювані |
| | | обслуговувані | необслуговувані | обслуговувані та необслуговувані |
| Конкретного призначення | Об'єкти неперервного тривалого застосування (НПТЗ) | $K_{Г}^{**}$ або $K_{Т.В.}$; T_0 ; $T_{В}^{*}$ | $K_{Г.}$, T_0 ; $T_{В}^{*}$ | $P(t_{б.р.})^{**}$ або $T_{сер.}$ |
| | Об'єкти многократного циклического застосування (МКЦЗ) | $K_{о.г}(t_{б.р.}) = K_{Г.} \cdot P(t_{б.р.})$; $T_{В}$ | | $P_{0(вмик.)}$ і $T_{сер.}$ |
| | Об'єкти однократного застосування (з попереднім періодом очікування) (ОКРЗ) | $K_{Т.В.оч.}$; $P(t_{б.р.})$; $T_{В.оч.}$ | $K_{Г.оч.}$; $P(t_{б.р.})$; $T_{В.оч.}$ | $P(t_{оч.})$; $P(t_{б.р.})$ |
| Загального призначення | Об'єкти НПТЗ і МКЦЗ | $K_{Т.В.}$, T_0 ; $T_{В}^{*}$ | $K_{Г.}$, T_0 ; $T_{В}^{*}$ | $T_{Г}^{**}$ або $T_{сер.}$ |
| | Об'єкти ОКРЗ | - | - | $P_{0(вмик.)}$ |
| Конкретного призначення | При наявності частково непрацездатного стану | $K_{эф.}$; $T_{ч.с.ч.}^{*}$ | | $K_{эф.}$ |
| Загального призначення | | $K_{Т.В.с.ч.}$; T_0 с.ч. | $K_{Г.с.ч.}$; T_0 с.ч. | $T_{ч.с.ч.}^{*}$ або $T_{сер.с.ч.}^{*}$ |

У дод. В1 позначено основні показники безвідмовності, ремонтпридатності та комплексні показники, які забезпечують виконання виробом його службового призначення: $K_{Г}$ – коефіцієнт готовності; $K_{Г.оч.}$ – коефіцієнт готовності в режимі очікування; $K_{Г.с.ч.}$ – коефіцієнт готовності складової частини; $K_{Т.В.}$ – коефіцієнт технічного використання; $K_{Т.В.оч.}$ – коефіцієнт технічного використання в режимі очікування застосування; $K_{Т.В.с.ч.}$ – коефіцієнт технічного використання складової частини; $K_{эф.}$ – коефіцієнт збереження ефективності; $K_{о.г}(t_{б.р.}) = K_{Г.} \cdot P(t_{б.р.})$; T_0 – середнє напрацювання на відмову; T_0 с.ч. – середнє напрацювання на відмову складової частини; $T_{В}$ – середній час відновлення; $T_{В.оч.}$ – середній час відновлення в режимі очікування; $T_{сер.}$ – середнє напрацювання до відмови; $P(t_{б.р.})$ – ймовірність безвідмовної роботи при напрацюванні $t_{б.р.}$ ($t_{б.р.}$ – напрацювання, в межах якого ймовірність безвідмовної роботи не нижча заданої); $P_{0(вмик.)}$ – ймовірність безвідмовного спрацювання (вмикання); $P(t_{оч.})$ – ймовірність безвідмовного очікування застосування за призначенням; $T_{Г}$ – гамма-відсоткове напрацювання до відмови; $T_{ч.с.ч.}$ – середній час відновлення складової частини об'єкта; $T_{сер.с.ч.}$ – середнє напрацювання до відмови складової частини об'єкта.

Вибір номенклатури показників довговічності

| Класифікація виробів за ознаками, що визначають вибір показників надійності | | | | |
|---|---|--|--|---|
| Можливі наслідки переходу у граничний стан | Основний процес, що визначає перехід у граничний стан | Можливість і спосіб відновлення технічного ресурсу (термін служби) | | |
| | | неремонтовані | ремонтовані традиційним способом | ремонтовані нетрадиційним способом |
| Об'єкти, перехід яких у граничний стан при виконанні ними службового призначення може привести до катастрофічних наслідків (контроль технічного стану можливий) | Зношування | $T_{p, \gamma \text{ сп.}}$ | $T_{p, \gamma \text{ К(С,П)}}$ | $T_{p, \gamma \text{ сп.}}; T_{p, \gamma \text{ К(С,П)}}$ |
| | Старіння | $T_{\text{сл. } \gamma \text{ сп.}}$ | $T_{\text{сл. } \gamma \text{ К(С,П)}}$ | $T_{\text{сл. } \gamma \text{ сп.}}; T_{\text{сл. } \gamma \text{ К(С,П)}}$ |
| | Зношування та старіння одночасно | $T_{p, \gamma \text{ сп.}};$ $T_{\text{сл. } \gamma \text{ сп.}}$ | $T_{p, \gamma \text{ К(С,П)}};$ $T_{\text{сл. } \gamma \text{ К(С,П)}}$ | $T_{p, \gamma \text{ сп.}}; T_{p, \gamma \text{ К(С,П)}};$ $T_{\text{сл. } \gamma \text{ сп.}}; T_{\text{сл. } \gamma \text{ К(С,П)}}$ |
| Об'єкти, перехід яких у граничний стан при виконанні ними службового призначення не призводить до катастрофічних наслідків | Зношування | $T_{p, \text{сер. сп.}}$ | $T_{p, \text{сер. К(С,П)}}$ | $T_{p, \text{сер. сп.}};$ $T_{p, \text{сер. К(С,П)}}$ |
| | Старіння | $T_{\text{сл. сер. сп.}}$ | $T_{\text{сл. сер. К(С,П)}}$ | $T_{\text{сл. сер. сп.}};$ $T_{\text{сл. сер. К(С,П)}}$ |
| | Зношування та старіння одночасно | $T_{p, \text{сер. сп.}};$ $T_{\text{сл. сер. сп.}}$ | $T_{p, \text{сер. К(С,П)}};$ $T_{\text{сл. сер. К(С,П)}}$ | $T_{p, \text{сер. сп.}};$ $T_{p, \text{сер. К(С,П)}};$ $T_{\text{сл. сер. сп.}};$ $T_{\text{сл. сер. К(С,П)}}$ |

У дод. В2 позначено основні показники довговічності, які забезпечують виконання виробом його службового призначення: $T_{p, \gamma \text{ сп.}}$ – гамма-відсотковий ресурс до списання (повний); $T_{p, \gamma \text{ К(С,П)}}$ – гамма-відсотковий ресурс до капітального ремонту, (середнього, поточного); $T_{\text{сл. } \gamma \text{ сп.}}$ – гамма-відсотковий термін служби до списання (повний); $T_{\text{сл. } \gamma \text{ К(С,П)}}$ – гамма-відсотковий термін служби до капітального ремонту (середнього, поточного); $T_{p, \text{сер. сп.}}$ – середній ресурс до списання (повний); $T_{p, \text{сер. К(С,П)}}$ – середній ресурс до капітального ремонту (середнього, поточного); $T_{\text{сл. сер. сп.}}$ – середній термін служби до списання (повний); $T_{\text{сл. сер. К(С,П)}}$ – середній термін служби до капітального ремонту (середнього, поточного).

Додаток В3

Вибір номенклатури показників збережливості

| Ознака, що визначає вибір показника збережливості | Заданий показник |
|---|---|
| Можливі наслідки досягнення граничного стану або відмови при зберіганні і/або транспортуванні | |
| Об'єкти, досягнення граничного стану якими або відмови яких при зберіганні і/або транспортуванні можуть привести до катастрофічних наслідків (контроль технічного стану можливий) | $T_{зб. \gamma}$ |
| Об'єкти, досягнення граничного стану якими або відмови яких при зберіганні і/або транспортуванні не приводять до катастрофічних наслідків | $T_{зб. ср.}$ $\left\{ \begin{array}{l} P(t_{xp.}) \\ P(l_{mp.}) \end{array} \right\}$ |

У дод. В3 позначено основні показники збережливості виробу у його життєвому циклі: $T_{зб. ср.}$ – середній термін збережливості; $T_{зб. \gamma}$ – гамма-відсотковий термін збережливості; $P(t_{xp.})$ – ймовірність безвідмовного зберігання ($t_{xp.}$ – термін зберігання); $P(l_{mp.})$ – ймовірність безвідмовного транспортування ($l_{mp.}$ – дальність транспортування).

Узагальнена схема вибору номенклатури заданих показників
надійності [434]

| Характеристика об'єкту | | Номенклатура заданих показників надійності |
|-------------------------|---------------------------------|--|
| Конкретного призначення | Відновлюваний і невідновлюваний | <p>1. Коефіцієнт збереження ефективності $k_{\text{эф}}$ або його модифікації, зокрема, для технологічних систем: «коефіцієнт збереження продуктивності», «ймовірність випуску заданої кількості продукції певного якості за зміну (місяць, квартал, рік) № тощо.</p> <p>2. Показники довговічності, якщо для об'єкта може бути однозначно сформульовано поняття «граничний стан» і визначені критерії його досягнення.</p> <p>3. Показники збережливості, якщо для об'єкта передбачають зберігання (транспортування) в повному складі і зібраному вигляді або показники зберігання окремо збережених (транспортуються) частин об'єкта.</p> |
| | Відновлюваний | <u>Додатково:</u> Комплексний показник надійності і, при необхідності, один із визначаючих його показників безвідмовності або ремонтопридатності |
| | Невідновлюваний | <u>Додатково:</u> Одиничний показник безвідмовності |
| Загального призначення | Відновлюваний і невідновлюваний | <p>Набір показників надійності складових частин об'єкта.</p> <p>Показники довговічності та збережливості, вибрані аналогічно об'єкту конкретного призначення</p> |
| | Відновлюваний | <u>Додатково:</u> Комплексний показник надійності і, при необхідності, один із визначаючих його показників безвідмовності або ремонтопридатності |
| | Невідновлюваний | <u>Додатково:</u> Одиничний показник безвідмовності |

1. Розроблення структури технологічного маршруту оброблення поверхні $\varnothing 90h7$ за критерієм гомогенності матеріалу валу 6E4-2717.00.00.01.

1.1. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки.

1. Вхідні дані - $\varnothing 90h7$ мм.

1.1. Вид (обробки)-заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----------|
| 95 | |
| 121 | 0 |
| 158 | 0 1.978 |
| 161 | 1 2.083 |
| 164 | 2 2.199 |
| 95 | 3 2.207 |
| 141 | 4 2.215 |
| 96 | 5 1.978 |
| 101 | 6 2.149 |
| 95 | 7 1.982 |
| 101 | 8 2.004 |
| 106 | 9 1.978 |
| 106 | 10 2.004 |
| 118 | 11 2.025 |
| 108 | 12 2.025 |
| 134 | 13 2.072 |
| 134 | 14 2.033 |
| 131 | 15 2.127 |
| 162 | 16 2.127 |
| 134 | 17 2.117 |
| 118 | 18 2.21 |
| 158 | 19 2.127 |
| 103 | 20 2.072 |
| 102 | 21 2.199 |
| 165 | 22 2.013 |
| 156 | 23 2.009 |
| 131 | 24 2.217 |
| 134 | 25 2.193 |
| 164 | 26 2.117 |
| 123 | 27 2.127 |
| 118 | 28 2.215 |
| 113 | 29 2.09 |
| 115 | 30 2.072 |
| 115 | 31 2.053 |
| 104 | 32 2.061 |
| | 33 2.061 |
| | 34 2.017 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 6.123$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 18.773 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.815$$

1.2. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чорнового точіння поверхні $\varnothing 90h7$ мм.

1. Вхідні дані - $\varnothing 90h7$ мм.

1.1. Вид (обробки) - токарна чорнова.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | | |
|-------|-----|----------|
| Hi := | 170 | |
| | 176 | 0 |
| | 165 | 0 2.23 |
| | 165 | 1 2.246 |
| | 163 | 2 2.217 |
| | 164 | 3 2.217 |
| | 164 | 4 2.212 |
| | 165 | 5 2.215 |
| | 165 | 6 2.215 |
| | 165 | 7 2.217 |
| | 165 | 8 2.217 |
| | 163 | 9 2.217 |
| | 163 | 10 2.212 |
| | 168 | 11 2.212 |
| | 171 | 12 2.225 |
| | 171 | 13 2.233 |
| | 171 | 14 2.233 |
| | 185 | 15 2.233 |
| | 170 | 16 2.267 |
| | 170 | 17 2.23 |
| | 171 | 18 2.23 |
| | 171 | 19 2.233 |
| | 170 | 20 2.233 |
| | 168 | 21 2.23 |
| | 168 | 22 2.225 |
| | 168 | 23 2.225 |
| | 181 | 24 2.258 |
| | 165 | 25 2.217 |
| | 163 | 26 2.212 |
| | 163 | 27 2.212 |
| | 163 | 28 2.212 |
| | 167 | 29 2.223 |
| | 167 | 30 2.223 |
| | 176 | 31 2.246 |
| | 176 | 32 2.246 |
| | 174 | 33 2.241 |
| | 176 | 34 2.246 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла (m) 1.1284

$$m := \frac{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}{m = 35.367}$$

$$m = 35.367$$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 3.239 \%$$

2.3. константа матеріалу (Am)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.962$$

1.3. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чистового точіння поверхні $\varnothing 90h7$ мм.

1. Вхідні дані - $\varnothing 90h7$ мм.

1.1. Вид (обробки) - токарна чистова.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----|
| 154 | |
| 145 | |
| 149 | 0 |
| 148 | 1 |
| 148 | 2 |
| 150 | 3 |
| 150 | 4 |
| 150 | 5 |
| 150 | 6 |
| 150 | 7 |
| 150 | 8 |
| 150 | 9 |
| 150 | 10 |
| 154 | 11 |
| 151 | 12 |
| 150 | 13 |
| 151 | 14 |
| 149 | 15 |
| 150 | 16 |
| 151 | 17 |
| 149 | 18 |
| 148 | 19 |
| 148 | 20 |
| 148 | 21 |
| 148 | 22 |
| 148 | 23 |
| 148 | 24 |
| 148 | 25 |
| 148 | 26 |
| 148 | 27 |
| 148 | 28 |
| 148 | 29 |
| 149 | 30 |
| 148 | 31 |
| 150 | 32 |
| 150 | 33 |
| 150 | 34 |

| 0 | |
|----|-------|
| 0 | 2.188 |
| 1 | 2.161 |
| 2 | 2.173 |
| 3 | 2.17 |
| 4 | 2.17 |
| 5 | 2.176 |
| 6 | 2.176 |
| 7 | 2.176 |
| 8 | 2.176 |
| 9 | 2.176 |
| 10 | 2.176 |
| 11 | 2.176 |
| 12 | 2.188 |
| 13 | 2.179 |
| 14 | 2.176 |
| 15 | 2.179 |
| 16 | 2.173 |
| 17 | 2.176 |
| 18 | 2.179 |
| 19 | 2.173 |
| 20 | 2.17 |
| 21 | 2.17 |
| 22 | 2.17 |
| 23 | 2.17 |
| 24 | 2.17 |
| 25 | 2.17 |
| 26 | 2.17 |
| 27 | 2.17 |
| 28 | 2.17 |
| 29 | 2.17 |
| 30 | 2.173 |
| 31 | 2.17 |
| 32 | 2.176 |
| 33 | 2.176 |
| 34 | 2.176 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 98.822$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 1.146 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.986$

1.4. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після попереднього шліфування поверхні $\varnothing 90h7$ мм.

1. Вхідні дані - $\varnothing 90h7$ мм.

1.1. Вид (обробки)-шліфування попереднє.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-----|----|-------|
| 165 | | 0 |
| 165 | 0 | 2.217 |
| 165 | 1 | 2.217 |
| 165 | 2 | 2.217 |
| 165 | 3 | 2.217 |
| 165 | 4 | 2.217 |
| 164 | 5 | 2.217 |
| 165 | 6 | 2.215 |
| 165 | 7 | 2.217 |
| 164 | 8 | 2.217 |
| 166 | 9 | 2.215 |
| 165 | 10 | 2.22 |
| 165 | 11 | 2.217 |
| 164 | 12 | 2.217 |
| 166 | 13 | 2.215 |
| 166 | 14 | 2.22 |
| 166 | 15 | 2.22 |
| 166 | 16 | 2.22 |
| 165 | 17 | 2.22 |
| 164 | 18 | 2.217 |
| 164 | 19 | 2.215 |
| 164 | 20 | 2.215 |
| 164 | 21 | 2.215 |
| 164 | 22 | 2.215 |
| 164 | 23 | 2.215 |
| 165 | 24 | 2.217 |
| 165 | 25 | 2.217 |
| 164 | 26 | 2.215 |
| 165 | 27 | 2.217 |
| 165 | 28 | 2.217 |
| 165 | 29 | 2.217 |
| 165 | 30 | 2.217 |
| 165 | 31 | 2.217 |
| 164 | 32 | 2.215 |
| 165 | 33 | 2.217 |
| 162 | 34 | 2.21 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 229.716$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 0.49 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.994$$

1.5. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після кінцевого шліфування поверхні $\varnothing 90h7\text{мм}$.

1. Вхідні дані - $\varnothing 90h7\text{ мм}$.

1.1. Вид (обробки)-шліфування кінцеве.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-----|----|-------|
| 170 | | 0 |
| 168 | 0 | 2.23 |
| 168 | 1 | 2.225 |
| 168 | 2 | 2.225 |
| 167 | 3 | 2.225 |
| 168 | 4 | 2.223 |
| 167 | 5 | 2.225 |
| 168 | 6 | 2.223 |
| 167 | 7 | 2.225 |
| 168 | 8 | 2.223 |
| 168 | 9 | 2.225 |
| 168 | 10 | 2.225 |
| 168 | 11 | 2.225 |
| 168 | 12 | 2.225 |
| 168 | 13 | 2.225 |
| 168 | 14 | 2.225 |
| 168 | 15 | 2.225 |
| 168 | 16 | 2.225 |
| 167 | 17 | 2.225 |
| 168 | 18 | 2.223 |
| 168 | 19 | 2.225 |
| 168 | 20 | 2.225 |
| 168 | 21 | 2.225 |
| 168 | 22 | 2.225 |
| 168 | 23 | 2.225 |
| 168 | 24 | 2.225 |
| 168 | 25 | 2.225 |
| 167 | 26 | 2.223 |
| 167 | 27 | 2.223 |
| 167 | 28 | 2.223 |
| 168 | 29 | 2.225 |
| 168 | 30 | 2.225 |
| 168 | 31 | 2.225 |
| 168 | 32 | 2.225 |
| 168 | 33 | 2.225 |
| 167 | 34 | 2.223 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 333.893$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 0.338 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.996$

2. Розроблення структури технологічного маршруту оброблення поверхні $\varnothing 125h7$ (зліва після шийки в розмір $\varnothing 90h7$) за критерієм гомогенності матеріалу валу 6E4-2717.00.00.01

2.1. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (зліва).

1.1. Вид (обробки)-заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----------|
| 108 | |
| 141 | |
| 176 | |
| 126 | |
| 138 | |
| 131 | |
| 155 | |
| 154 | |
| 158 | |
| 142 | |
| 109 | |
| 108 | |
| 111 | |
| 158 | |
| 147 | |
| 155 | |
| 131 | |
| 141 | |
| 148 | |
| 138 | |
| 95 | |
| 98 | |
| 113 | |
| 123 | |
| 108 | |
| 149 | |
| 161 | |
| 162 | |
| 153 | |
| 159 | |
| 98 | |
| 96 | |
| 98 | |
| 109 | |
| 118 | |
| | 0 |
| | 0 2.033 |
| | 1 2.149 |
| | 2 2.246 |
| | 3 2.1 |
| | 4 2.14 |
| | 5 2.117 |
| | 6 2.19 |
| | 7 2.188 |
| | 8 2.199 |
| | 9 2.152 |
| | 10 2.037 |
| | 11 2.033 |
| | 12 2.045 |
| | 13 2.199 |
| | 14 2.167 |
| | 15 2.19 |
| | 16 2.117 |
| | 17 2.149 |
| | 18 2.17 |
| | 19 2.14 |
| | 20 1.978 |
| | 21 1.991 |
| | 22 2.053 |
| | 23 2.09 |
| | 24 2.033 |
| | 25 2.173 |
| | 26 2.207 |
| | 27 2.21 |
| | 28 2.185 |
| | 29 2.201 |
| | 30 1.991 |
| | 31 1.982 |
| | 32 1.991 |
| | 33 2.037 |
| | 34 2.072 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 6.132$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 17.872 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.815$

2.2. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чорного точіння поверхні $\varnothing 125h7$ (зліва)

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (зліва)

1.1. Вид (обробки) - токарна чорнова.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | |
|-----------|----------|
| 158 | |
| 152 | |
| 151 | |
| 154 | |
| 151 | |
| 141 | |
| 148 | |
| 142 | |
| 144 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 142 | |
| 142 | |
| 143 | |
| 148 | |
| 144 | |
| 147 | |
| Hi := 145 | |
| 145 | |
| 151 | |
| 158 | |
| 155 | |
| 151 | |
| 151 | |
| 151 | |
| 153 | |
| 154 | |
| 141 | |
| 142 | |
| 149 | |
| 149 | |
| 143 | |
| 143 | |
| 153 | |
| (151) | |
| | 0 |
| | 0 2.199 |
| | 1 2.182 |
| | 2 2.179 |
| | 3 2.188 |
| | 4 2.179 |
| | 5 2.149 |
| | 6 2.17 |
| | 7 2.152 |
| | 8 2.158 |
| | 9 2.176 |
| | 10 2.176 |
| | 11 2.152 |
| | 12 2.152 |
| | 13 2.155 |
| | 14 2.17 |
| | 15 2.158 |
| | 16 2.167 |
| | 17 2.161 |
| | 18 2.161 |
| | 19 2.179 |
| | 20 2.199 |
| | 21 2.19 |
| | 22 2.179 |
| | 23 2.179 |
| | 24 2.179 |
| | 25 2.185 |
| | 26 2.188 |
| | 27 2.149 |
| | 28 2.152 |
| | 29 2.173 |
| | 30 2.173 |
| | 31 2.155 |
| | 32 2.155 |
| | 33 2.185 |
| | 34 2.179 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 34.023$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 3.318 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.961$

2.3. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чистового точення поверхні $\varnothing 125h7$ (зліва)

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм(зліва)

1.1. Вид (обробки)-токарна чистова.

1.2. Кількість вимірювань: n = 35

| | | |
|---------|----|-------|
| (148) | | 0 |
| 148 | 0 | 2.17 |
| 148 | 1 | 2.17 |
| 147 | 2 | 2.17 |
| 147 | 3 | 2.167 |
| 150 | 4 | 2.167 |
| 149 | 5 | 2.176 |
| 149 | 6 | 2.173 |
| 149 | 7 | 2.173 |
| 149 | 8 | 2.173 |
| 146 | 9 | 2.173 |
| 146 | 10 | 2.164 |
| 146 | 11 | 2.164 |
| 146 | 12 | 2.164 |
| 146 | 13 | 2.164 |
| 145 | 14 | 2.164 |
| 149 | 15 | 2.161 |
| 147 | 16 | 2.173 |
| 149 | 17 | 2.167 |
| 146 | 18 | 2.173 |
| 148 | 19 | 2.164 |
| 152 | 20 | 2.17 |
| 148 | 21 | 2.182 |
| 146 | 22 | 2.17 |
| 146 | 23 | 2.164 |
| 146 | 24 | 2.164 |
| 146 | 25 | 2.164 |
| 145 | 26 | 2.161 |
| 145 | 27 | 2.161 |
| 145 | 28 | 2.161 |
| 145 | 29 | 2.161 |
| 145 | 30 | 2.161 |
| 145 | 31 | 2.161 |
| 145 | 32 | 2.161 |
| 145 | 33 | 2.161 |
| (145) | 34 | 2.161 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

m = 91.926

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

v = 1.233 %

2.3. константа матеріалу (Am)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

Am = 0.985

2.4. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після попереднього шліфування поверхні $\varnothing 125h7$ (зліва)

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (зліва)

1.1. Вид (обробки) - шліфування попереднє.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | |
|----------|--------------|-------|----------|
| $H_i :=$ | $\lg(H_i) =$ | (156) | |
| | | 155 | 0 |
| | | 154 | 0 2.193 |
| | | 154 | 1 2.19 |
| | | 154 | 2 2.188 |
| | | 154 | 3 2.188 |
| | | 153 | 4 2.188 |
| | | 154 | 5 2.185 |
| | | 154 | 6 2.188 |
| | | 153 | 7 2.188 |
| | | 154 | 8 2.185 |
| | | 154 | 9 2.188 |
| | | 154 | 10 2.188 |
| | | 154 | 11 2.188 |
| | | 154 | 12 2.188 |
| | | 153 | 13 2.188 |
| | | 153 | 14 2.185 |
| | | 155 | 15 2.185 |
| | | 154 | 16 2.19 |
| | | 157 | 17 2.188 |
| | | 155 | 18 2.196 |
| | | 154 | 19 2.19 |
| | | 154 | 20 2.188 |
| | | 154 | 21 2.188 |
| | | 154 | 22 2.188 |
| | | 154 | 23 2.188 |
| | | 154 | 24 2.188 |
| | | 154 | 25 2.188 |
| | | 154 | 26 2.188 |
| | | 155 | 27 2.19 |
| | | 153 | 28 2.185 |
| | | 155 | 29 2.19 |
| | | 154 | 30 2.188 |
| | | 154 | 31 2.188 |
| | | 154 | 32 2.188 |
| 154 | 33 2.188 | | |
| (154) | 34 2.188 | | |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 215.619$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 0.525 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.994$$

2.5. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після кінцевого шліфування поверхні $\varnothing 125h7$ (зліва)

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (зліва)

1.1. Вид (обробки)-шліфування кінцеве.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | 0 |
|-----------|-------------------|
| 157 | |
| 158 | 0 2.196 |
| 158 | 1 2.199 |
| 158 | 2 2.199 |
| 158 | 3 2.199 |
| 158 | 4 2.199 |
| 158 | 5 2.199 |
| 158 | 6 2.199 |
| 158 | 7 2.199 |
| 158 | 8 2.199 |
| 158 | 9 2.199 |
| 158 | 10 2.199 |
| 158 | 11 2.199 |
| 159 | 12 2.199 |
| 158 | 13 2.201 |
| 159 | 14 2.199 |
| 158 | 15 2.201 |
| Hi := 158 | lg(Hi) = 16 2.199 |
| 158 | 17 2.199 |
| 158 | 18 2.199 |
| 159 | 19 2.199 |
| 158 | 20 2.201 |
| 158 | 21 2.199 |
| 158 | 22 2.199 |
| 158 | 23 2.199 |
| 158 | 24 2.199 |
| 158 | 25 2.199 |
| 158 | 26 2.199 |
| 159 | 27 2.201 |
| 159 | 28 2.201 |
| 159 | 29 2.201 |
| 159 | 30 2.201 |
| 159 | 31 2.201 |
| 159 | 32 2.201 |
| 159 | 33 2.201 |
| 159 | 34 2.201 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

m = 344.588

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

v = 0.328 %

2.3. константа матеріалу (Am)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

Am = 0.996

3. Розроблення структури технологічного маршруту оброблення поверхні $\varnothing 148h9$ (зліва) за критерієм гомогенності матеріалу валу 6E4-2717.00.00.01

3.1. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки

1. Вхідні дані - $\varnothing 148h9$ мм (зліва).

1.1. Вид (обробки)-заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-------|----------|
| (110) | |
| 113 | |
| 115 | |
| 126 | |
| 121 | |
| 118 | |
| 129 | |
| 127 | |
| 111 | |
| 111 | |
| 112 | |
| 113 | |
| 96 | |
| 105 | |
| 118 | |
| 116 | |
| 115 | |
| 113 | |
| 121 | |
| 122 | |
| 125 | |
| 158 | |
| 143 | |
| 122 | |
| 141 | |
| 140 | |
| 140 | |
| 132 | |
| 144 | |
| 124 | |
| 124 | |
| 154 | |
| 132 | |
| 124 | |
| (161) | |
| | 0 |
| | 0 2.041 |
| | 1 2.053 |
| | 2 2.061 |
| | 3 2.1 |
| | 4 2.083 |
| | 5 2.072 |
| | 6 2.111 |
| | 7 2.104 |
| | 8 2.045 |
| | 9 2.045 |
| | 10 2.049 |
| | 11 2.053 |
| | 12 1.982 |
| | 13 2.021 |
| | 14 2.072 |
| | 15 2.064 |
| | 16 2.061 |
| | 17 2.053 |
| | 18 2.083 |
| | 19 2.086 |
| | 20 2.097 |
| | 21 2.199 |
| | 22 2.155 |
| | 23 2.086 |
| | 24 2.149 |
| | 25 2.146 |
| | 26 2.146 |
| | 27 2.121 |
| | 28 2.158 |
| | 29 2.093 |
| | 30 2.093 |
| | 31 2.188 |
| | 32 2.121 |
| | 33 2.093 |
| | 34 2.207 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 9.665$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 11.979 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.874$$

3.2. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чорнового точіння поверхні $\varnothing 148h9$ (зліва)

1. Вхідні дані - $\varnothing 148h9$ мм (зліва)

1.1. Вид (обробки) - токарна чорнова.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-----------|----|-------|
| (159) | | |
| 164 | 0 | 2.201 |
| 167 | 1 | 2.215 |
| 161 | 2 | 2.223 |
| 161 | 3 | 2.207 |
| 163 | 4 | 2.207 |
| 164 | 5 | 2.212 |
| 164 | 6 | 2.215 |
| 163 | 7 | 2.215 |
| 163 | 8 | 2.212 |
| 163 | 9 | 2.212 |
| 165 | 10 | 2.212 |
| 164 | 11 | 2.217 |
| 164 | 12 | 2.215 |
| 165 | 13 | 2.215 |
| 164 | 14 | 2.217 |
| 165 | 15 | 2.215 |
| Hi := 167 | 16 | 2.217 |
| 165 | 17 | 2.223 |
| 177 | 18 | 2.217 |
| 174 | 19 | 2.248 |
| 165 | 20 | 2.241 |
| 169 | 21 | 2.217 |
| 167 | 22 | 2.228 |
| 161 | 23 | 2.223 |
| 161 | 24 | 2.207 |
| 165 | 25 | 2.207 |
| 164 | 26 | 2.217 |
| 161 | 27 | 2.215 |
| 164 | 28 | 2.207 |
| 162 | 29 | 2.215 |
| 163 | 30 | 2.21 |
| 168 | 31 | 2.212 |
| 148 | 32 | 2.225 |
| (161) | 33 | 2.17 |
| | 34 | 2.207 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 40.891$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 2.74 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.967$

3.3. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чистового точіння поверхні $\varnothing 148h9$ (зліва)

1. Вхідні дані - $\varnothing 148h9$ мм (зліва)

1.1. Вид (обробки) - токарна чистова.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-------|--------------|----------|
| (159) | | 0 |
| 156 | $H_i :=$ | 0 2.201 |
| 156 | | 1 2.193 |
| 156 | | 2 2.193 |
| 156 | | 3 2.193 |
| 156 | | 4 2.193 |
| 156 | | 5 2.193 |
| 158 | | 6 2.193 |
| 159 | | 7 2.199 |
| 161 | | 8 2.201 |
| 161 | | 9 2.207 |
| 159 | | 10 2.207 |
| 160 | | 11 2.201 |
| 161 | | 12 2.204 |
| 158 | | 13 2.207 |
| 159 | | 14 2.199 |
| 156 | | 15 2.201 |
| 158 | $\lg(H_i) =$ | 16 2.193 |
| 161 | | 17 2.199 |
| 159 | | 18 2.207 |
| 160 | | 19 2.201 |
| 158 | | 20 2.204 |
| 157 | | 21 2.199 |
| 159 | | 22 2.196 |
| 161 | | 23 2.201 |
| 157 | | 24 2.207 |
| 159 | | 25 2.196 |
| 157 | | 26 2.201 |
| 156 | | 27 2.196 |
| 160 | | 28 2.193 |
| 156 | | 29 2.204 |
| 158 | | 30 2.193 |
| 157 | | 31 2.199 |
| 157 | | 32 2.196 |
| 160 | | 33 2.196 |
| (160) | | 34 2.204 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$$m = 100.433$$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 1.125 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.986$$

3.4. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного шліфування поверхні $\varnothing 148h9$ (зліва)

1. Вхідні дані - $\varnothing 148h9$ мм (зліва)

1.1. Вид (обробки) - шліфування однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|-------|
| 159 | |
| 159 | 0 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 1 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 2 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 3 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 4 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 5 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 6 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 7 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 8 |
| 159 | 2.201 |
| 160 | 9 |
| 159 | 2.204 |
| 159 | 10 |
| 159 | 2.201 |
| 159 | 11 |
| 159 | 2.201 |
| 160 | 12 |
| 160 | 2.201 |
| 160 | 13 |
| 160 | 2.204 |
| 160 | 14 |
| 160 | 2.204 |
| 160 | 15 |
| 160 | 2.204 |
| 160 | 16 |
| 160 | 2.204 |
| 160 | 17 |
| 160 | 2.204 |
| 160 | 18 |
| 160 | 2.204 |
| 160 | 19 |
| 160 | 2.204 |
| 160 | 20 |
| 160 | 2.204 |
| 161 | 21 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 22 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 23 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 24 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 25 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 26 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 27 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 28 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 29 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 30 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 31 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 32 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 33 |
| 161 | 2.207 |
| 161 | 34 |
| 161 | 2.207 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 206.457$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 0.547 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.993$

4. Розроблення структури технологічного маршруту оброблення поверхні
 $\varnothing 156h14$ за критерієм гомогенності матеріалу валу 6E4-2717.00.00.01

4.1. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу
 заготовки

1. Вхідні дані - $\varnothing 156 h14$ мм.

1.1. Вид (обробки)-заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----------|
| 110 | |
| 143 | 0 |
| 125 | 0 2.041 |
| 145 | 1 2.155 |
| 123 | 2 2.097 |
| 118 | 3 2.161 |
| 131 | 4 2.09 |
| 124 | 5 2.072 |
| 95 | 6 2.117 |
| 124 | 7 2.093 |
| 125 | 8 1.978 |
| 96 | 9 2.093 |
| 125 | 10 2.097 |
| 124 | 11 1.982 |
| 124 | 12 2.097 |
| 124 | 13 2.093 |
| 124 | 14 2.093 |
| 124 | 15 2.093 |
| 124 | 16 2.093 |
| 129 | 17 2.093 |
| 129 | 18 2.111 |
| 151 | 19 2.111 |
| 149 | 20 2.179 |
| 124 | 21 2.173 |
| 115 | 22 2.093 |
| 126 | 23 2.061 |
| 128 | 24 2.1 |
| 126 | 25 2.107 |
| 126 | 26 2.1 |
| 127 | 27 2.1 |
| 129 | 28 2.104 |
| 121 | 29 2.111 |
| 150 | 30 2.083 |
| 113 | 31 2.176 |
| 126 | 32 2.053 |
| 125 | 33 2.1 |
| | 34 2.097 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності
 Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 11.457$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 9.625 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.892$

4.2. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного точіння поверхні $\varnothing 156h14$

1. Вхідні дані - діаметр 156h14.

1.1. Вид (обробки) - токарна однократна.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-------|-------|
| (178) | |
| 175 | 0 |
| 166 | 2.25 |
| 166 | 1 |
| 166 | 2.243 |
| 166 | 2 |
| 166 | 2.22 |
| 166 | 3 |
| 166 | 2.22 |
| 165 | 4 |
| 166 | 2.22 |
| 164 | 5 |
| 164 | 2.22 |
| 164 | 6 |
| 164 | 2.217 |
| 161 | 7 |
| 167 | 2.22 |
| 182 | 8 |
| 168 | 2.215 |
| 163 | 9 |
| 183 | 2.215 |
| 171 | 10 |
| 172 | 2.215 |
| 158 | 11 |
| 164 | 2.207 |
| 164 | 12 |
| 163 | 2.223 |
| 163 | 13 |
| 183 | 2.26 |
| 171 | 14 |
| 172 | 2.225 |
| 158 | 15 |
| 164 | 2.212 |
| 164 | 16 |
| 163 | 2.262 |
| 163 | 17 |
| 183 | 2.233 |
| 166 | 18 |
| 166 | 2.236 |
| 164 | 19 |
| 164 | 2.199 |
| 166 | 20 |
| 166 | 2.215 |
| 164 | 21 |
| 166 | 2.215 |
| 166 | 22 |
| 164 | 2.212 |
| 166 | 23 |
| 166 | 2.212 |
| 170 | 24 |
| 174 | 2.262 |
| | 25 |
| | 2.22 |
| | 26 |
| | 2.22 |
| | 27 |
| | 2.215 |
| | 28 |
| | 2.22 |
| | 29 |
| | 2.22 |
| | 30 |
| | 2.233 |
| | 31 |
| | 2.228 |
| | 32 |
| | 2.228 |
| | 33 |
| | 2.23 |
| | 34 |
| | 2.241 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 32.06$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 3.588 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.959$

5. Розроблення структури технологічного маршруту оброблення поверхні $\varnothing 148h9$ (справа) за критерієм гомогенності матеріалу валу 6Е4-2717.00.00.01

5.1. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки

1. Вхідні дані - $\varnothing 148h9$ мм (справа).

1.1. Вид (обробки) - заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----------|----|
| 123 | |
| 110 | 0 |
| 112 | 1 |
| 135 | 2 |
| 113 | 3 |
| 115 | 4 |
| 129 | 5 |
| 122 | 6 |
| 98 | 7 |
| 98 | 8 |
| 95 | 9 |
| 96 | 10 |
| 118 | 11 |
| 114 | 12 |
| 128 | 13 |
| 125 | 14 |
| 125 | 15 |
| Hi := 123 | 16 |
| 114 | 17 |
| 115 | 18 |
| 141 | 19 |
| 118 | 20 |
| 114 | 21 |
| 110 | 22 |
| 131 | 23 |
| 121 | 24 |
| 122 | 25 |
| 124 | 26 |
| 125 | 27 |
| 124 | 28 |
| 124 | 29 |
| 154 | 30 |
| 116 | 31 |
| 116 | 32 |
| 115 | 33 |
| 115 | 34 |

| 0 | |
|----|-------|
| 0 | 2.09 |
| 1 | 2.041 |
| 2 | 2.049 |
| 3 | 2.13 |
| 4 | 2.053 |
| 5 | 2.061 |
| 6 | 2.111 |
| 7 | 2.086 |
| 8 | 1.991 |
| 9 | 1.991 |
| 10 | 1.978 |
| 11 | 1.982 |
| 12 | 2.072 |
| 13 | 2.057 |
| 14 | 2.107 |
| 15 | 2.097 |
| 16 | 2.097 |
| 17 | 2.09 |
| 18 | 2.057 |
| 19 | 2.061 |
| 20 | 2.149 |
| 21 | 2.072 |
| 22 | 2.057 |
| 23 | 2.041 |
| 24 | 2.117 |
| 25 | 2.083 |
| 26 | 2.086 |
| 27 | 2.093 |
| 28 | 2.097 |
| 29 | 2.093 |
| 30 | 2.093 |
| 31 | 2.188 |
| 32 | 2.064 |
| 33 | 2.064 |
| 34 | 2.061 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 11.142$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 10.097 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.889$

5.2. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чорнового точіння поверхні $\varnothing 148h9$ (справа)

1. Вхідні дані - $\varnothing 148h9$ мм (справа)

1.1. Вид (обробки) - токарна чорнова.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----------|
| 149 | |
| 171 | |
| 171 | 0 |
| 165 | 0 2.173 |
| 164 | 1 2.233 |
| 165 | 2 2.233 |
| 165 | 3 2.217 |
| 171 | 4 2.215 |
| 171 | 5 2.217 |
| 171 | 6 2.217 |
| 171 | 7 2.233 |
| 171 | 8 2.233 |
| 167 | 9 2.233 |
| 165 | 10 2.233 |
| 163 | 11 2.223 |
| 168 | 12 2.217 |
| 165 | 13 2.212 |
| 163 | 14 2.225 |
| 169 | 15 2.217 |
| 164 | 16 2.212 |
| 164 | 17 2.228 |
| 162 | 18 2.215 |
| 164 | 19 2.215 |
| 162 | 20 2.21 |
| 164 | 21 2.215 |
| 162 | 22 2.21 |
| 162 | 23 2.21 |
| 164 | 24 2.215 |
| 164 | 25 2.215 |
| 164 | 26 2.215 |
| 165 | 27 2.217 |
| 166 | 28 2.22 |
| 174 | 29 2.241 |
| 165 | 30 2.217 |
| 170 | 31 2.23 |
| 178 | 32 2.25 |
| 171 | 33 2.233 |
| 171 | 34 2.233 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 37.694$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 2.956 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.965$

5.3. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чистового точіння поверхні $\varnothing 148h9$ (справа)

1. Вхідні дані - $\varnothing 148h9$ мм (справа)

1.1. Вид (обробки) - токарна чистова.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----------|--|
| 165 | |
| 165 | |
| 167 | |
| 166 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 168 | |
| 163 | |
| 166 | |
| 166 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 164 | |
| Hi := 165 | |
| 166 | |
| 167 | |
| 164 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 165 | |
| 164 | |
| 165 | |
| 167 | |
| 167 | |
| 167 | |
| 168 | |
| 170 | |
| 172 | |
| 172 | |

| 0 | |
|----|-------|
| 0 | 2.217 |
| 1 | 2.217 |
| 2 | 2.223 |
| 3 | 2.22 |
| 4 | 2.217 |
| 5 | 2.217 |
| 6 | 2.217 |
| 7 | 2.217 |
| 8 | 2.217 |
| 9 | 2.225 |
| 10 | 2.212 |
| 11 | 2.22 |
| 12 | 2.22 |
| 13 | 2.217 |
| 14 | 2.217 |
| 15 | 2.217 |
| 16 | 2.215 |
| 17 | 2.217 |
| 18 | 2.22 |
| 19 | 2.223 |
| 20 | 2.215 |
| 21 | 2.217 |
| 22 | 2.217 |
| 23 | 2.217 |
| 24 | 2.217 |
| 25 | 2.217 |
| 26 | 2.215 |
| 27 | 2.217 |
| 28 | 2.223 |
| 29 | 2.223 |
| 30 | 2.223 |
| 31 | 2.225 |
| 32 | 2.23 |
| 33 | 2.236 |
| 34 | 2.236 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 93.542$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 1.218 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.985$

5.4. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного шліфування поверхні $\varnothing 148h9$ (справа)

1. Вхідні дані - $\varnothing 148h9$ мм (справа)

1.1. Вид (обробки)-шліфування однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|--|
| 157 | |
| 155 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 157 | |
| 157 | |
| 157 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 156 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 156 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 154 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 154 | |
| 153 | |

| 0 | |
|----|-------|
| 0 | 2.196 |
| 1 | 2.19 |
| 2 | 2.193 |
| 3 | 2.193 |
| 4 | 2.193 |
| 5 | 2.196 |
| 6 | 2.196 |
| 7 | 2.196 |
| 8 | 2.19 |
| 9 | 2.19 |
| 10 | 2.19 |
| 11 | 2.193 |
| 12 | 2.19 |
| 13 | 2.19 |
| 14 | 2.193 |
| 15 | 2.193 |
| 16 | 2.193 |
| 17 | 2.188 |
| 18 | 2.19 |
| 19 | 2.19 |
| 20 | 2.19 |
| 21 | 2.19 |
| 22 | 2.19 |
| 23 | 2.19 |
| 24 | 2.193 |
| 25 | 2.193 |
| 26 | 2.193 |
| 27 | 2.193 |
| 28 | 2.193 |
| 29 | 2.193 |
| 30 | 2.193 |
| 31 | 2.193 |
| 32 | 2.193 |
| 33 | 2.188 |
| 34 | 2.185 |

$H_i :=$

$\lg(H_i) =$

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 198.228$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 0.568 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.993$

6. Розроблення структури технологічного маршруту оброблення поверхні $\varnothing 125h7$ (справа) за критерієм гомогенності матеріалу вала 6E4-2717.00.00.01

6.1. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (справа).

1.1. Вид (обробки)-заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | |
|-----|----|
| 110 | |
| 113 | 0 |
| 116 | 1 |
| 165 | 2 |
| 168 | 3 |
| 156 | 4 |
| 118 | 5 |
| 154 | 6 |
| 101 | 7 |
| 111 | 8 |
| 115 | 9 |
| 101 | 10 |
| 101 | 11 |
| 154 | 12 |
| 159 | 13 |
| 105 | 14 |
| 105 | 15 |
| 105 | 16 |
| 118 | 17 |
| 118 | 18 |
| 118 | 19 |
| 118 | 20 |
| 151 | 21 |
| 153 | 22 |
| 153 | 23 |
| 116 | 24 |
| 158 | 25 |
| 114 | 26 |
| 154 | 27 |
| 153 | 28 |
| 157 | 29 |
| 118 | 30 |
| 99 | 31 |
| 96 | 32 |
| 98 | 33 |
| 121 | 34 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 6.101$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 18.8 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.814$

6.2. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чорнового точіння поверхні $\varnothing 125h7$ (справа)

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (справа)

1.1. Вид (обробки) - токарна чорнова.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----------|----------|
| 151 | |
| 156 | |
| 154 | |
| 153 | |
| 153 | |
| 149 | |
| 151 | |
| 162 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 165 | |
| 148 | |
| 147 | |
| 147 | |
| 144 | |
| Hi := 144 | lg(Hi) = |
| 141 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 152 | |
| 154 | |
| 158 | |
| 158 | |
| 148 | |
| 149 | |
| 149 | |
| 149 | |
| 149 | |
| 149 | |
| 159 | |
| 159 | |

| 0 | |
|----|-------|
| 0 | 2.179 |
| 1 | 2.193 |
| 2 | 2.188 |
| 3 | 2.185 |
| 4 | 2.185 |
| 5 | 2.173 |
| 6 | 2.179 |
| 7 | 2.21 |
| 8 | 2.188 |
| 9 | 2.188 |
| 10 | 2.188 |
| 11 | 2.188 |
| 12 | 2.217 |
| 13 | 2.17 |
| 14 | 2.167 |
| 15 | 2.167 |
| 16 | 2.158 |
| 17 | 2.158 |
| 18 | 2.149 |
| 19 | 2.188 |
| 20 | 2.188 |
| 21 | 2.188 |
| 22 | 2.188 |
| 23 | 2.182 |
| 24 | 2.188 |
| 25 | 2.199 |
| 26 | 2.199 |
| 27 | 2.17 |
| 28 | 2.173 |
| 29 | 2.173 |
| 30 | 2.173 |
| 31 | 2.173 |
| 32 | 2.173 |
| 33 | 2.201 |
| 34 | 2.201 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 33.809$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 3.343 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.961$

6.3. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після чистового точіння поверхні $\varnothing 125h7$ (справа)

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (справа)

1.1. Вид (обробки) - токарна чистова.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----|
| 149 | |
| 151 | 0 |
| 150 | 1 |
| 151 | 2 |
| 151 | 3 |
| 150 | 4 |
| 148 | 5 |
| 148 | 6 |
| 148 | 7 |
| 148 | 8 |
| 148 | 9 |
| 145 | 10 |
| 144 | 11 |
| 145 | 12 |
| 145 | 13 |
| 146 | 14 |
| 150 | 15 |
| 151 | 16 |
| 151 | 17 |
| 152 | 18 |
| 150 | 19 |
| 150 | 20 |
| 149 | 21 |
| 149 | 22 |
| 149 | 23 |
| 149 | 24 |
| 149 | 25 |
| 148 | 26 |
| 149 | 27 |
| 148 | 28 |
| 148 | 29 |
| 148 | 30 |
| 148 | 31 |
| 148 | 32 |
| 149 | 33 |
| 148 | 34 |

| | 0 |
|----|-------|
| 0 | 2.173 |
| 1 | 2.179 |
| 2 | 2.176 |
| 3 | 2.179 |
| 4 | 2.179 |
| 5 | 2.176 |
| 6 | 2.17 |
| 7 | 2.17 |
| 8 | 2.17 |
| 9 | 2.17 |
| 10 | 2.17 |
| 11 | 2.161 |
| 12 | 2.158 |
| 13 | 2.161 |
| 14 | 2.161 |
| 15 | 2.164 |
| 16 | 2.176 |
| 17 | 2.179 |
| 18 | 2.179 |
| 19 | 2.182 |
| 20 | 2.176 |
| 21 | 2.176 |
| 22 | 2.173 |
| 23 | 2.173 |
| 24 | 2.173 |
| 25 | 2.173 |
| 26 | 2.17 |
| 27 | 2.173 |
| 28 | 2.17 |
| 29 | 2.17 |
| 30 | 2.17 |
| 31 | 2.17 |
| 32 | 2.17 |
| 33 | 2.173 |
| 34 | 2.17 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 88.031$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 1.277 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.985$$

6.4. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після попереднього шліфування поверхні $\varnothing 125h7$ (справа)

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (справа)

1.1. Вид (обробки) - шліфування попереднє.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-----|----|-------|
| 155 | | 0 |
| 154 | 0 | 2.19 |
| 155 | 1 | 2.188 |
| 155 | 2 | 2.19 |
| 155 | 3 | 2.19 |
| 155 | 4 | 2.19 |
| 155 | 5 | 2.19 |
| 155 | 6 | 2.19 |
| 154 | 7 | 2.19 |
| 152 | 8 | 2.188 |
| 155 | 9 | 2.182 |
| 155 | 10 | 2.19 |
| 155 | 11 | 2.19 |
| 155 | 12 | 2.19 |
| 155 | 13 | 2.19 |
| 155 | 14 | 2.19 |
| 154 | 15 | 2.19 |
| 155 | 16 | 2.188 |
| 156 | 17 | 2.19 |
| 155 | 18 | 2.193 |
| 155 | 19 | 2.19 |
| 155 | 20 | 2.19 |
| 155 | 21 | 2.19 |
| 155 | 22 | 2.19 |
| 155 | 23 | 2.19 |
| 155 | 24 | 2.19 |
| 155 | 25 | 2.19 |
| 155 | 26 | 2.19 |
| 153 | 27 | 2.185 |
| 154 | 28 | 2.188 |
| 154 | 29 | 2.188 |
| 155 | 30 | 2.19 |
| 155 | 31 | 2.19 |
| 157 | 32 | 2.196 |
| 155 | 33 | 2.19 |
| 155 | 34 | 2.19 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 218.554$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 0.515 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.994$

6.5. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після кінцевого шліфування поверхні $\varnothing 125h7$ (справа)

1. Вхідні дані - $\varnothing 125h7$ мм (справа)

1.1. Вид (обробки)-шліфування кінцеве.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----|
| 160 | |
| 158 | |
| 158 | 0 |
| 158 | 1 |
| 158 | 2 |
| 158 | 3 |
| 158 | 4 |
| 158 | 5 |
| 158 | 6 |
| 158 | 7 |
| 157 | 8 |
| 158 | 9 |
| 158 | 10 |
| 158 | 11 |
| 158 | 12 |
| 158 | 13 |
| 158 | 14 |
| 157 | 15 |
| 157 | 16 |
| 158 | 17 |
| 158 | 18 |
| 158 | 19 |
| 158 | 20 |
| 158 | 21 |
| 158 | 22 |
| 158 | 23 |
| 158 | 24 |
| 158 | 25 |
| 158 | 26 |
| 158 | 27 |
| 157 | 28 |
| 158 | 29 |
| 158 | 30 |
| 157 | 31 |
| 157 | 32 |
| 158 | 33 |
| 158 | 34 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 336.864$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 0.336 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.996$$

1. Розроблення структури технологічного маршруту оброблення бобишок (деталь № 1) за критерієм гомогенності матеріалу кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса

1.1. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки лівої бобишки.

1. Вхідні дані - бобишка ліва зовнішня (деталь № 1).

1.1. Вид (обробки) - заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----------|
| 98 | |
| 139 | |
| 102 | |
| 134 | |
| 98 | |
| 104 | |
| 95 | |
| 158 | |
| 95 | |
| 179 | |
| 133 | |
| 177 | |
| 134 | |
| 158 | |
| 95 | |
| 151 | |
| 112 | |
| 113 | |
| 98 | |
| 96 | |
| 139 | |
| 95 | |
| 154 | |
| 132 | |
| 112 | |
| 100 | |
| 117 | |
| 136 | |
| 118 | |
| 140 | |
| 128 | |
| 105 | |
| 149 | |
| 109 | |
| 130 | |
| | 0 |
| | 0 1.991 |
| | 1 2.143 |
| | 2 2.009 |
| | 3 2.127 |
| | 4 1.991 |
| | 5 2.017 |
| | 6 1.978 |
| | 7 2.199 |
| | 8 1.978 |
| | 9 2.253 |
| | 10 2.124 |
| | 11 2.248 |
| | 12 2.127 |
| | 13 2.199 |
| | 14 1.978 |
| | 15 2.179 |
| | 16 2.049 |
| | 17 2.053 |
| | 18 1.991 |
| | 19 1.982 |
| | 20 2.143 |
| | 21 1.978 |
| | 22 2.188 |
| | 23 2.121 |
| | 24 2.049 |
| | 25 2 |
| | 26 2.068 |
| | 27 2.134 |
| | 28 2.072 |
| | 29 2.146 |
| | 30 2.107 |
| | 31 2.021 |
| | 32 2.173 |
| | 33 2.037 |
| | 34 2.114 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 5.843$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 19.767 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.807$$

1.2. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного фрезерування лівої бобишки

1. Вхідні дані - бобишка ліва зовнішня (деталь № 1).

1.1. Вид (обробки) - фрезерування однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|--|
| 141 | |
| 145 | |
| 151 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 152 | |
| 150 | |
| 152 | |
| 154 | |
| 156 | |
| 154 | |
| 153 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 155 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 153 | |
| 153 | |
| 153 | |
| 151 | |
| 153 | |
| 153 | |
| 151 | |
| 153 | |
| 153 | |
| 151 | |
| 153 | |
| 154 | |
| 153 | |
| 152 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 150 | |

| | 0 |
|----|-------|
| 0 | 2.149 |
| 1 | 2.161 |
| 2 | 2.179 |
| 3 | 2.176 |
| 4 | 2.176 |
| 5 | 2.182 |
| 6 | 2.176 |
| 7 | 2.182 |
| 8 | 2.188 |
| 9 | 2.193 |
| 10 | 2.188 |
| 11 | 2.185 |
| 12 | 2.19 |
| 13 | 2.19 |
| 14 | 2.19 |
| 15 | 2.188 |
| 16 | 2.188 |
| 17 | 2.185 |
| 18 | 2.185 |
| 19 | 2.185 |
| 20 | 2.179 |
| 21 | 2.185 |
| 22 | 2.185 |
| 23 | 2.185 |
| 24 | 2.179 |
| 25 | 2.185 |
| 26 | 2.188 |
| 27 | 2.185 |
| 28 | 2.182 |
| 29 | 2.188 |
| 30 | 2.188 |
| 31 | 2.188 |
| 32 | 2.176 |
| 33 | 2.176 |
| 34 | 2.176 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 58.607$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 1.887 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.977$

1.3. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного торцювання лівої бобишки

1. Вхідні дані - бобишка ліва зовнішня (деталь № 1).

1.1. Вид (обробки)-торцювання однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | | |
|-----------|--------------|-------|
| (139) | | 0 |
| 138 | 0 | 2.143 |
| 138 | 1 | 2.14 |
| 137 | 2 | 2.14 |
| 138 | 3 | 2.137 |
| 136 | 4 | 2.14 |
| 134 | 5 | 2.134 |
| 135 | 6 | 2.127 |
| 136 | 7 | 2.13 |
| 135 | 8 | 2.134 |
| 136 | 9 | 2.13 |
| 135 | 10 | 2.134 |
| 134 | 11 | 2.13 |
| 133 | 12 | 2.127 |
| 133 | 13 | 2.124 |
| 135 | 14 | 2.124 |
| 133 | 15 | 2.13 |
| Hi := 133 | log(Hi) = 16 | 2.124 |
| 133 | 17 | 2.124 |
| 132 | 18 | 2.124 |
| 132 | 19 | 2.121 |
| 132 | 20 | 2.121 |
| 132 | 21 | 2.121 |
| 132 | 22 | 2.121 |
| 132 | 23 | 2.121 |
| 132 | 24 | 2.121 |
| 132 | 25 | 2.121 |
| 132 | 26 | 2.121 |
| 132 | 27 | 2.121 |
| 132 | 28 | 2.121 |
| 132 | 29 | 2.121 |
| 132 | 30 | 2.121 |
| 133 | 31 | 2.124 |
| 134 | 32 | 2.127 |
| 138 | 33 | 2.14 |
| 138 | 34 | 2.14 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 65.787$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 1.724 \%$

2.3. константа матеріалу (Am)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.979$

1.4. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки правої бобишки.

1. Вхідні дані - бобишка права зовнішня (деталь № 1).

1.1. Вид (обробки)-заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | |
|-----|----------|
| 130 | |
| 150 | 0 |
| 119 | 0 2.114 |
| 139 | 1 2.176 |
| 187 | 2 2.076 |
| 142 | 3 2.143 |
| 173 | 4 2.272 |
| 102 | 5 2.152 |
| 158 | 6 2.238 |
| 97 | 7 2.009 |
| 96 | 8 2.199 |
| 97 | 9 1.987 |
| 99 | 10 1.982 |
| 110 | 11 1.987 |
| 112 | 12 1.996 |
| 102 | 13 2.041 |
| 97 | 14 2.049 |
| 108 | 15 2.009 |
| 95 | 16 1.987 |
| 149 | 17 2.033 |
| 137 | 18 1.978 |
| 142 | 19 2.173 |
| 140 | 20 2.137 |
| 137 | 21 2.152 |
| 136 | 22 2.146 |
| 142 | 23 2.137 |
| 144 | 24 2.134 |
| 144 | 25 2.152 |
| 144 | 26 2.158 |
| 143 | 27 2.158 |
| 143 | 28 2.158 |
| 142 | 29 2.155 |
| 136 | 30 2.155 |
| 142 | 31 2.152 |
| 142 | 32 2.134 |
| 95 | 33 2.152 |
| | 34 1.978 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 5.975$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 18.44 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.811$

1.5. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного фрезерування правої бобишки

1. Вхідні дані - бобишка права зовнішня (деталь № 1).

1.1. Вид (обробки) - фрезерування однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-----|----|-------|
| 147 | | 0 |
| 148 | 0 | 2.167 |
| 146 | 1 | 2.17 |
| 154 | 2 | 2.164 |
| 153 | 3 | 2.188 |
| 154 | 4 | 2.185 |
| 153 | 5 | 2.188 |
| 152 | 6 | 2.185 |
| 151 | 7 | 2.182 |
| 151 | 8 | 2.179 |
| 150 | 9 | 2.179 |
| 150 | 10 | 2.176 |
| 149 | 11 | 2.176 |
| 149 | 12 | 2.173 |
| 149 | 13 | 2.173 |
| 149 | 14 | 2.173 |
| 147 | 15 | 2.173 |
| 148 | 16 | 2.167 |
| 147 | 17 | 2.17 |
| 146 | 18 | 2.167 |
| 146 | 19 | 2.164 |
| 146 | 20 | 2.164 |
| 146 | 21 | 2.164 |
| 147 | 22 | 2.167 |
| 146 | 23 | 2.164 |
| 145 | 24 | 2.161 |
| 145 | 25 | 2.161 |
| 145 | 26 | 2.161 |
| 145 | 27 | 2.161 |
| 146 | 28 | 2.164 |
| 147 | 29 | 2.167 |
| 146 | 30 | 2.164 |
| 146 | 31 | 2.164 |
| 145 | 32 | 2.161 |
| 144 | 33 | 2.158 |
| 145 | 34 | 2.161 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 59.129$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 1.922 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.977$$

1.6. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного торцювання правої бобишки

1. Вхідні дані - бобишка права зовнішня (деталь № 1).

1.1. Вид (обробки)-торцювання однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-----|----|-------|
| 135 | | 0 |
| 133 | 0 | 2.13 |
| 134 | 1 | 2.124 |
| 131 | 2 | 2.127 |
| 134 | 3 | 2.117 |
| 131 | 4 | 2.127 |
| 131 | 5 | 2.117 |
| 131 | 6 | 2.117 |
| 129 | 7 | 2.117 |
| 129 | 8 | 2.111 |
| 130 | 9 | 2.111 |
| 130 | 10 | 2.114 |
| 129 | 11 | 2.114 |
| 129 | 12 | 2.111 |
| 126 | 13 | 2.111 |
| 127 | 14 | 2.1 |
| 127 | 15 | 2.104 |
| 127 | 16 | 2.104 |
| 127 | 17 | 2.104 |
| 127 | 18 | 2.104 |
| 126 | 19 | 2.104 |
| 127 | 20 | 2.1 |
| 128 | 21 | 2.104 |
| 128 | 22 | 2.107 |
| 128 | 23 | 2.107 |
| 128 | 24 | 2.107 |
| 128 | 25 | 2.107 |
| 127 | 26 | 2.104 |
| 128 | 27 | 2.107 |
| 128 | 28 | 2.107 |
| 128 | 29 | 2.107 |
| 128 | 30 | 2.107 |
| 128 | 31 | 2.107 |
| 128 | 32 | 2.107 |
| 128 | 33 | 2.107 |
| 128 | 34 | 2.107 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i)\right)\right]^2}}$$

$m = 64.246$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i}\right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i\right)\right]^2\right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 1.774 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4}\right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.979$

2. Розроблення структури технологічного маршруту оброблення бобишок (деталь № 2) за критерієм гомогенності матеріалу кронштейна підтримки штанги СП1-2110830 тролейбуса

2.1. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки лівої бобишки.

1. Вхідні дані - бобишка ліва зовнішня (деталь № 2).

1.1. Вид (обробки) - заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | |
|-----|--|
| 172 | |
| 123 | |
| 96 | |
| 156 | |
| 156 | |
| 152 | |
| 138 | |
| 138 | |
| 196 | |
| 139 | |
| 137 | |
| 137 | |
| 135 | |
| 100 | |
| 100 | |
| 139 | |
| 124 | |
| 124 | |
| 98 | |
| 101 | |
| 95 | |
| 120 | |
| 151 | |
| 119 | |
| 117 | |
| 117 | |
| 116 | |
| 117 | |
| 117 | |
| 117 | |
| 117 | |
| 117 | |
| 117 | |
| 117 | |
| 118 | |
| 118 | |
| 121 | |
| 121 | |

| | 0 |
|----|-------|
| 0 | 2.236 |
| 1 | 2.09 |
| 2 | 1.982 |
| 3 | 2.193 |
| 4 | 2.193 |
| 5 | 2.182 |
| 6 | 2.14 |
| 7 | 2.14 |
| 8 | 2.292 |
| 9 | 2.143 |
| 10 | 2.137 |
| 11 | 2.137 |
| 12 | 2.13 |
| 13 | 2 |
| 14 | 2 |
| 15 | 2.143 |
| 16 | 2.093 |
| 17 | 2.093 |
| 18 | 1.991 |
| 19 | 2.004 |
| 20 | 1.978 |
| 21 | 2.079 |
| 22 | 2.179 |
| 23 | 2.076 |
| 24 | 2.068 |
| 25 | 2.068 |
| 26 | 2.064 |
| 27 | 2.068 |
| 28 | 2.068 |
| 29 | 2.068 |
| 30 | 2.068 |
| 31 | 2.072 |
| 32 | 2.072 |
| 33 | 2.083 |
| 34 | 2.083 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 6.803$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 17.371 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.83$

2.2. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного фрезерування лівої бобишки

1. Вхідні дані - бобишка ліва зовнішня (деталь № 2).

1.1. Вид (обробки) - фрезерування однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | |
|----------|--------------|
| 148 | |
| 144 | |
| 147 | |
| 147 | |
| 146 | |
| 150 | |
| 151 | |
| 149 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 151 | |
| 152 | |
| 151 | |
| 150 | |
| 151 | |
| 150 | |
| 145 | |
| 144 | |
| 143 | |
| 143 | |
| 143 | |
| 144 | |
| 144 | |
| 145 | |
| 145 | |
| 145 | |
| 146 | |
| 146 | |
| 147 | |
| 147 | |
| 148 | |
| $H_i :=$ | $\lg(H_i) =$ |
| | 0 |
| | 0 2.17 |
| | 1 2.158 |
| | 2 2.167 |
| | 3 2.167 |
| | 4 2.164 |
| | 5 2.176 |
| | 6 2.179 |
| | 7 2.173 |
| | 8 2.176 |
| | 9 2.176 |
| | 10 2.176 |
| | 11 2.176 |
| | 12 2.176 |
| | 13 2.179 |
| | 14 2.182 |
| | 15 2.179 |
| | 16 2.176 |
| | 17 2.179 |
| | 18 2.176 |
| | 19 2.161 |
| | 20 2.158 |
| | 21 2.155 |
| | 22 2.155 |
| | 23 2.155 |
| | 24 2.155 |
| | 25 2.158 |
| | 26 2.158 |
| | 27 2.161 |
| | 28 2.161 |
| | 29 2.161 |
| | 30 2.164 |
| | 31 2.164 |
| | 32 2.167 |
| | 33 2.167 |
| | 34 2.17 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$$m = 57.554$$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 1.959 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.976$$

2.3. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного торцювання лівої бобишки

1. Вхідні дані - бобишка ліва зовнішня (деталь № 2).

1.1. Вид (обробки)-торцювання однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | |
|-----|--|
| 132 | |
| 130 | |
| 128 | |
| 129 | |
| 126 | |
| 132 | |
| 132 | |
| 132 | |
| 132 | |
| 132 | |
| 128 | |
| 128 | |
| 128 | |
| 129 | |
| 129 | |
| 129 | |
| 129 | |
| 129 | |
| 130 | |
| 130 | |
| 132 | |
| 132 | |
| 132 | |
| 132 | |
| 133 | |
| 133 | |
| 133 | |
| 134 | |
| 134 | |
| 134 | |
| 133 | |
| 134 | |
| 127 | |
| 127 | |

| | 0 |
|----|-------|
| 0 | 2.121 |
| 1 | 2.114 |
| 2 | 2.107 |
| 3 | 2.111 |
| 4 | 2.1 |
| 5 | 2.121 |
| 6 | 2.121 |
| 7 | 2.121 |
| 8 | 2.121 |
| 9 | 2.121 |
| 10 | 2.107 |
| 11 | 2.107 |
| 12 | 2.107 |
| 13 | 2.111 |
| 14 | 2.111 |
| 15 | 2.111 |
| 16 | 2.111 |
| 17 | 2.111 |
| 18 | 2.114 |
| 19 | 2.114 |
| 20 | 2.121 |
| 21 | 2.121 |
| 22 | 2.121 |
| 23 | 2.121 |
| 24 | 2.121 |
| 25 | 2.124 |
| 26 | 2.124 |
| 27 | 2.124 |
| 28 | 2.127 |
| 29 | 2.127 |
| 30 | 2.127 |
| 31 | 2.124 |
| 32 | 2.127 |
| 33 | 2.104 |
| 34 | 2.104 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 63.819$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 1.763 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.979$

2.4. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу заготовки правої бобишки.

1. Вхідні дані - бобишка права зовнішня (деталь № 2).

1.1. Вид (обробки)-заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-----|----|-------|
| 117 | | 0 |
| 151 | 0 | 2.068 |
| 95 | 1 | 2.179 |
| 96 | 2 | 1.978 |
| 124 | 3 | 1.982 |
| 118 | 4 | 2.093 |
| 100 | 5 | 2.072 |
| 99 | 6 | 2 |
| 161 | 7 | 1.996 |
| 137 | 8 | 2.207 |
| 129 | 9 | 2.137 |
| 106 | 10 | 2.111 |
| 106 | 11 | 2.025 |
| 132 | 12 | 2.025 |
| 130 | 13 | 2.121 |
| 103 | 14 | 2.114 |
| 104 | 15 | 2.013 |
| 167 | 16 | 2.017 |
| 188 | 17 | 2.223 |
| 120 | 18 | 2.274 |
| 123 | 19 | 2.079 |
| 104 | 20 | 2.09 |
| 123 | 21 | 2.017 |
| 95 | 22 | 2.09 |
| 134 | 23 | 1.978 |
| 121 | 24 | 2.127 |
| 142 | 25 | 2.083 |
| 123 | 26 | 2.152 |
| 124 | 27 | 2.09 |
| 115 | 28 | 2.093 |
| 167 | 29 | 2.061 |
| 125 | 30 | 2.223 |
| 164 | 31 | 2.097 |
| 180 | 32 | 2.215 |
| | 33 | 2.255 |
| 121 | 34 | 2.083 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 6.059$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 19.478 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.813$

2.5. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного фрезерування правої бобишки

1. Вхідні дані - бобишка права зовнішня (деталь № 2).

1.1. Вид (обробки) - фрезерування однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | |
|-----|--|
| 147 | |
| 145 | |
| 147 | |
| 146 | |
| 146 | |
| 153 | |
| 154 | |
| 154 | |
| 153 | |
| 152 | |
| 152 | |
| 152 | |
| 152 | |
| 151 | |
| 151 | |
| 151 | |
| 151 | |
| 150 | |
| 151 | |
| 150 | |
| 150 | |
| 149 | |
| 149 | |
| 147 | |
| 148 | |
| 147 | |
| 146 | |
| 146 | |
| 146 | |
| 145 | |
| 146 | |
| 147 | |
| 147 | |
| 147 | |
| 144 | |

| | 0 |
|----|-------|
| 0 | 2.167 |
| 1 | 2.161 |
| 2 | 2.167 |
| 3 | 2.164 |
| 4 | 2.164 |
| 5 | 2.185 |
| 6 | 2.188 |
| 7 | 2.188 |
| 8 | 2.185 |
| 9 | 2.182 |
| 10 | 2.182 |
| 11 | 2.182 |
| 12 | 2.182 |
| 13 | 2.179 |
| 14 | 2.179 |
| 15 | 2.179 |
| 16 | 2.179 |
| 17 | 2.176 |
| 18 | 2.179 |
| 19 | 2.176 |
| 20 | 2.176 |
| 21 | 2.173 |
| 22 | 2.173 |
| 23 | 2.167 |
| 24 | 2.17 |
| 25 | 2.167 |
| 26 | 2.164 |
| 27 | 2.164 |
| 28 | 2.164 |
| 29 | 2.161 |
| 30 | 2.164 |
| 31 | 2.167 |
| 32 | 2.167 |
| 33 | 2.167 |
| 34 | 2.158 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 58.553$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$v = 1.93 \%$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$A_m = 0.977$

2.6. Розрахунок характеристик, що визначають однорідність матеріалу після однократного торцювання правої бобишки

1. Вхідні дані - бобишка права зовнішня (деталь № 2).

1.1. Вид (обробки) - торцювання однократне.

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | | |
|-----|----|-------|
| 127 | | 0 |
| 133 | 0 | 2.104 |
| 134 | 1 | 2.124 |
| 131 | 2 | 2.127 |
| 131 | 3 | 2.117 |
| 131 | 4 | 2.117 |
| 129 | 5 | 2.117 |
| 130 | 6 | 2.111 |
| 130 | 7 | 2.114 |
| 129 | 8 | 2.114 |
| 129 | 9 | 2.111 |
| 122 | 10 | 2.111 |
| 122 | 11 | 2.086 |
| 126 | 12 | 2.086 |
| 127 | 13 | 2.1 |
| 127 | 14 | 2.104 |
| 127 | 15 | 2.104 |
| 127 | 16 | 2.104 |
| 127 | 17 | 2.104 |
| 126 | 18 | 2.104 |
| 127 | 19 | 2.1 |
| 128 | 20 | 2.104 |
| 128 | 21 | 2.107 |
| 128 | 22 | 2.107 |
| 128 | 23 | 2.107 |
| 128 | 24 | 2.107 |
| 127 | 25 | 2.104 |
| 128 | 26 | 2.107 |
| 128 | 27 | 2.107 |
| 128 | 28 | 2.107 |
| 128 | 29 | 2.107 |
| 128 | 30 | 2.107 |
| 128 | 31 | 2.107 |
| 128 | 32 | 2.107 |
| 127 | 33 | 2.104 |
| 129 | 34 | 2.111 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m)

$$m := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\lg(H_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \lg(H_i) \right) \right]^2}}$$

$m = 61.221$

2.2. коефіцієнт варіації (v)

$$v := \left(\frac{1}{\frac{1}{n} \sum H_i} \right) \cdot \left[\frac{1}{n-1} \cdot \sum \left[H_i - \left(\frac{1}{n} \sum H_i \right) \right]^2 \right]^{0.5} \cdot 100$$

$$v = 1.839 \%$$

2.3. константа матеріалу (A_m)

$$A_m := \left(\frac{m+2}{4 \cdot m+4} \right)^{\frac{1}{m}}$$

$$A_m = 0.978$$

1. Аналіз структури технологічного маршруту: заготовка – чорнове фрезерування – чистове фрезерування для виливок із алюмінієвого сплаву АК

1.1. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 1, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 1, плавка 1

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| $H_{1i} :=$ | $H_{2i} :=$ | $H_{3i} :=$ |
| 53 | 54.5 | 59.5 |
| 50 | 52.5 | 61 |
| 51.5 | 51 | 61 |
| 51 | 55 | 60.5 |
| 54.5 | 55 | 64 |
| 53.5 | 57 | 60 |
| 50.5 | 56 | 61 |
| 53.5 | 57.5 | 61.5 |
| 51.5 | 58.5 | 61 |
| 52.5 | 56.5 | 60.5 |
| 49 | 52 | 60.5 |
| 51 | 54.5 | 59.5 |
| 53 | 57 | 58 |
| 53 | 54.5 | 58 |
| 52.5 | 55.5 | 55.5 |
| 53.5 | 57.5 | 57 |
| 54 | 56.5 | 58 |
| 55 | 52.5 | 58.5 |
| 54 | 58 | 57 |
| 45 | 56 | 54.5 |
| 49 | 55 | 58 |
| 51.5 | 59 | 58 |
| 55 | 56.5 | 59 |
| 53 | 56 | 58 |
| 54 | 56.5 | 57 |
| 54 | 53 | 57 |
| 56.5 | 56.5 | 58 |
| 56 | 55 | 58.5 |
| 55 | 60 | 58 |
| 54 | 55.5 | 58 |
| 52.5 | 57 | 58 |
| 52 | 57.5 | 58 |
| 50.5 | 58.5 | 56 |
| 50 | 55 | 55.5 |
| 50.5 | 60.5 | 55.5 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла для вхідної заготовки (m_1)

$$m_1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{1i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{1i}) \right) \right]^2}}$$

$m_1 = 25.2123$

2.2. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чорнового фрезерування (m_2)

$$m_2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{2i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{2i}) \right) \right]^2}}$$

$m_2 = 28.9996$

2.3. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чистового фрезерування (m_3)

$$m_3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{3i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{3i}) \right) \right]^2}}$$

$m_3 = 32.4926$

1.2. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 1, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 1, плавка 2

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|------|------|------|
| 48.5 | 47 | 50.5 |
| 53.5 | 54.5 | 54 |
| 57.5 | 55.5 | 63 |
| 54 | 58.5 | 57 |
| 57 | 54.5 | 56 |
| 53 | 53 | 55 |
| 53.5 | 57.5 | 56.5 |
| 48.5 | 58.5 | 55.5 |
| 47 | 62 | 57 |
| 45.5 | 56.5 | 55.5 |
| 48 | 54.5 | 54.5 |
| 51.5 | 55 | 49 |
| 49.5 | 54.5 | 50 |
| 50.5 | 51.5 | 47.5 |
| 52 | 49 | 47 |
| 49.5 | 49 | 51.5 |
| 46.5 | 46.5 | 52.5 |
| 48 | 52 | 54 |
| 43 | 56 | 48 |
| 50 | 56.5 | 52.5 |
| 56.5 | 42 | 56 |
| 52.5 | 56 | 57.5 |
| 56 | 57 | 59.5 |
| 52.5 | 57.5 | 58.5 |
| 52 | 58.5 | 58 |
| 54.5 | 56 | 57.5 |
| 52 | 56 | 56 |
| 53 | 52 | 55 |
| 51 | 57 | 56 |
| 51.5 | 49.5 | 55.5 |
| 52 | 50 | 54 |
| 55.5 | 50 | 52 |
| 54.5 | 51 | 52.5 |
| 58 | 53.5 | 53 |
| 49.5 | 57.5 | 52 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла для вхідної
заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 16.351$

2.2. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла після чорнового
фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 14.1029$

2.3. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла після чистового
фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 17.235$

1.3. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 2, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 2, плавка 1

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | | |
|-----------|-----------|-----------|
| $H1_i :=$ | $H2_i :=$ | $H3_i :=$ |
| 53.5 | 45 | 54.5 |
| 51.5 | 56.5 | 58 |
| 53.5 | 54 | 57.5 |
| 51.5 | 54 | 57.5 |
| 51 | 55.5 | 59.5 |
| 53.5 | 57.5 | 56.5 |
| 54. | 51.5 | 56.5 |
| 55.5 | 51.5 | 57 |
| 53.5 | 55 | 55.5 |
| 51 | 58 | 57 |
| 53.5 | 56.5 | 55.5 |
| 56 | 54.5 | 54.5 |
| 55 | 56.5 | 57.5 |
| 54 | 55 | 55 |
| 53.5 | 53.5 | 56 |
| 53.5 | 53 | 56 |
| 54 | 56 | 55 |
| 51.5 | 53 | 56 |
| 50.5 | 46 | 57 |
| 53 | 61 | 52 |
| 52.5 | 53 | 56 |
| 53.5 | 53 | 56 |
| 53 | 52 | 57.5 |
| 52.5 | 56 | 57 |
| 50 | 55 | 56 |
| 53.5 | 54 | 57 |
| 51 | 56 | 55.5 |
| 52 | 57 | 55.5 |
| 52.5 | 54.5 | 54 |
| 53.5 | 53.5 | 56 |
| 52 | 54.5 | 56 |
| 50 | 52.5 | 55.5 |
| 50 | 54 | 55.5 |
| 49 | 51.5 | 56 |
| 51.5 | 57.5 | 56.5 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла для вхідної заготовки ($m1$)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1_i) \right) \right]^2}}$$

$$m1 = 36.155$$

2.2. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла після чорнового фрезерування ($m2$)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2_i) \right) \right]^2}}$$

$$m2 = 19.6444$$

2.3. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла після чистового фрезерування ($m3$)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3_i) \right) \right]^2}}$$

$$m3 = 47.9663$$

1.4. Розрахунок коефіцієнта t для заготовки 2, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 2, плавка 2.

1.1. Вид (обробки) - заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | |
|-----------|------|------|------|
| $H1_i :=$ | 46.5 | 51 | 56 |
| | 51 | 59 | 56 |
| | 54 | 56 | 57.5 |
| | 55.5 | 58 | 58.5 |
| | 53 | 53.5 | 57.5 |
| | 51.5 | 56 | 58.5 |
| | 56 | 57 | 57.5 |
| | 51.5 | 54.5 | 57.5 |
| | 60 | 55 | 59 |
| | 56.5 | 54 | 58.5 |
| | 52 | 58 | 59 |
| | 53 | 55.5 | 59.5 |
| | 55 | 57.5 | 59 |
| | 53 | 59 | 59 |
| | 53.5 | 60 | 60.5 |
| | 44 | 56 | 59 |
| | 54 | 56.5 | 62 |
| | 53.5 | 54 | 61 |
| | 51 | 51 | 56.5 |
| | 51.5 | 54.5 | 54.5 |
| | 52 | 53 | 53 |
| | 45.5 | 58 | 52 |
| | 51 | 54.5 | 58.5 |
| | 54 | 54.5 | 57 |
| | 52.5 | 57 | 57 |
| | 56.5 | 53.5 | 57 |
| | 54 | 58 | 57 |
| | 50 | 55 | 58 |
| | 52.5 | 54.5 | 57.5 |
| | 53 | 57 | 56 |
| | 53.5 | 58 | 57 |
| | 51.5 | 58.5 | 57.5 |
| | 49.5 | 54.5 | 58 |
| | 52 | 54 | 57 |
| | 54 | 54.5 | 57 |

2. Результати розрахунків.

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла для вхідної заготовки ($m1$)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 19.0059$

2.2. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чорнового фрезерування ($m2$)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 28.4626$

2.3. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чистового фрезерування ($m3$)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 32.861$

1.5. Розрахунок коефіцієнта t для заготовки 3, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 3, плавка 1.

1.1. Вид (обробки) - заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-----------|-----------|-----------|
| $H1_i :=$ | $H2_i :=$ | $H3_i :=$ |
| 46.5 | 56 | 53 |
| 47.5 | 46.5 | 55 |
| 45.5 | 51.5 | 51 |
| 48.5 | 52 | 53 |
| 49.5 | 51 | 51.5 |
| 47.5 | 49.5 | 52.5 |
| 47.5 | 52.5 | 52 |
| 47.5 | 49 | 50.5 |
| 50 | 49 | 51.5 |
| 48 | 51.5 | 50 |
| 52 | 49.5 | 50.5 |
| 49 | 52.5 | 49.5 |
| 46.5 | 49 | 49 |
| 48 | 51.5 | 50.5 |
| 49 | 49 | 51.5 |
| 50 | 48 | 52 |
| 49 | 46 | 52 |
| 50.5 | 53 | 51.5 |
| 42 | 50.5 | 51 |
| 48 | 41 | 47 |
| 46.5 | 46 | 54 |
| 47 | 50 | 52.5 |
| 51 | 49.5 | 52.5 |
| 48 | 49.5 | 53.5 |
| 45.5 | 51 | 54 |
| 47.5 | 48.5 | 54.5 |
| 48.5 | 49 | 54 |
| 48 | 49 | 53.5 |
| 51 | 46 | 53.5 |
| 50.5 | 48.5 | 53.5 |
| 45.5 | 52 | 51 |
| 47 | 48 | 53 |
| 51 | 48 | 54 |
| 46 | 55 | 54 |
| 48 | 50 | 54 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла для вхідної заготовки ($m1$)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1_i) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 26.6374$

2.2. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чорнового фрезерування ($m2$)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2_i) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 19.878$

2.3. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чистового фрезерування ($m3$)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3_i) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 32.8868$

1.6. Розрахунок коефіцієнта t для заготовки 3, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 3, плавка 2.

1.1. Вид (обробки) - заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| $H_{1i} :=$ | $H_{2i} :=$ | $H_{3i} :=$ |
| 42 | 50.5 | 49 |
| 47 | 45.5 | 54 |
| 47.5 | 50 | 52.5 |
| 46.5 | 46.5 | 52 |
| 46 | 45.5 | 49.5 |
| 45 | 49.5 | 50 |
| 47.5 | 52 | 51 |
| 47.5 | 50.5 | 51 |
| 47 | 46.5 | 52.5 |
| 44.5 | 48 | 51.5 |
| 46 | 48 | 52 |
| 47 | 53.5 | 51 |
| 46.5 | 48.5 | 52 |
| 46 | 46.5 | 50.5 |
| 47.5 | 53.5 | 51 |
| 47 | 56.5 | 50.5 |
| 47.5 | 50 | 52 |
| 40.5 | 52 | 52.5 |
| 45.5 | 43.5 | 51 |
| 48 | 48 | 46 |
| 48 | 48 | 52 |
| 51.5 | 43 | 49.5 |
| 49 | 51.5 | 53 |
| 48 | 46 | 52 |
| 46 | 54 | 50.5 |
| 49.5 | 49 | 50 |
| 46 | 49.5 | 49.5 |
| 49 | 46 | 52 |
| 49.5 | 48 | 49.5 |
| 46 | 47 | 48.5 |
| 44 | 48 | 51.5 |
| 49 | 42 | 53 |
| 47 | 47.5 | 50 |
| 48 | 51.5 | 51 |
| 46 | 46.5 | 51 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності.
Вейбулла для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{1i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{1i}) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 25.0523$

2.2. коефіцієнт гомогенності.
Вейбулла після чорнового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{2i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{2i}) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 17.1602$

2.3. коефіцієнт гомогенності.
Вейбулла після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{3i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{3i}) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 37.1519$

1.7. Розрахунок коефіцієнта t для заготовки 4, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 4, плавка 1.

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | | | |
|----------|------|----------|------|----------|------|
| $H1i :=$ | 42 | $H2i :=$ | 56 | $H3i :=$ | 57 |
| | 54 | | 49 | | 59 |
| | 55.5 | | 57 | | 57 |
| | 52 | | 50.5 | | 60 |
| | 54.5 | | 54 | | 58.5 |
| | 51 | | 52.5 | | 58 |
| | 47.5 | | 58 | | 55.5 |
| | 45.5 | | 52.5 | | 53 |
| | 48 | | 54 | | 53 |
| | 50.5 | | 52.5 | | 50.5 |
| | 43 | | 49 | | 49 |
| | 49.5 | | 48.5 | | 43 |
| | 51 | | 46 | | 50 |
| | 51.5 | | 45 | | 50 |
| | 51.5 | | 51 | | 51.5 |
| | 54 | | 51.5 | | 53.5 |
| | 50 | | 52 | | 54 |
| | 50.5 | | 54 | | 57 |
| | 45.5 | | 54 | | 54 |
| | 48.5 | | 52.5 | | 51 |
| | 48.5 | | 53 | | 55 |
| | 57 | | 52.5 | | 54.5 |
| | 54 | | 56 | | 56 |
| | 55.5 | | 47 | | 57 |
| | 55 | | 57 | | 56.5 |
| | 55 | | 44.5 | | 56 |
| | 52 | | 47.5 | | 52.5 |
| | 49.5 | | 42 | | 50 |
| | 52 | | 47 | | 46 |
| | 49.5 | | 54.5 | | 48.5 |
| | 48.5 | | 58 | | 52.5 |
| | 48.5 | | 52 | | 53.5 |
| | 50.5 | | 55.5 | | 48 |
| | 54.5 | | 53 | | 49 |
| | 51.5 | | 50 | | 49 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 15.8889$

2.2. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чорнового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 14.3107$

2.3. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 14.8554$

1.8. Розрахунок коефіцієнта t для заготовки 4, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 4, плавка 2

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | | | |
|-----------|--------|-----------|----------|-----------|--------|
| $H1_i :=$ | (47) | $H2_i :=$ | (52.5) | $H3_i :=$ | (56) |
| | 47 | | 53 | | 58 |
| | 48 | | 50.5 | | 57 |
| | 48.5 | | 51.5 | | 56 |
| | 47 | | 46.5 | | 54 |
| | 48.5 | | 53.5 | | 55.5 |
| | 51 | | 50 | | 53 |
| | 44.5 | | 51 | | 47.5 |
| | 46 | | 50.5 | | 53 |
| | 46.5 | | 44.5 | | 52.5 |
| | 49.5 | | 55 | | 53 |
| | 51.5 | | 46 | | 53.5 |
| | 55 | | 54 | | 50.5 |
| | 53 | | 54.5 | | 53 |
| | 51.5 | | 55.5 | | 53.5 |
| | 47 | | 58.5 | | 56.5 |
| | 43 | | 51.5 | | 57 |
| | 51.5 | | 52 | | 59.5 |
| | 48 | | 46 | | 57 |
| | 54.5 | | 49 | | 56 |
| | 51.5 | | 55 | | 56.5 |
| | 55 | | 57 | | 57.5 |
| | 54 | | 49.5 | | 55 |
| | 50 | | 50.5 | | 56 |
| | 51.5 | | 52 | | 55 |
| | 49.5 | | 47.5 | | 52.5 |
| | 51 | | 52 | | 51.5 |
| | 51.5 | | 54.5 | | 52.5 |
| | 47 | | 51.5 | | 52 |
| | 51 | | 53 | | 54 |
| | 50 | | 50 | | 55.5 |
| | 49.5 | | 47 | | 56.5 |
| | 51 | | 53 | | 56 |
| | 53 | | 57 | | 56.5 |
| | 46.5 | | 54.5 | | 54.5 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1_i) \right) \right]^2}}$$

$$m1 = 18.8556$$

2.2. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після чорнового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2_i) \right) \right]^2}}$$

$$m2 = 17.183$$

2.3. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3_i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3_i) \right) \right]^2}}$$

$$m3 = 25.1739$$

1.9. Розрахунок коефіцієнта t для заготовки 5, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 5, плавка 1.

1.1. Вид (обробки) - заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | | | |
|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| $H1_i :=$ | 51 | $H2_i :=$ | 55 | $H3_i :=$ | 56 |
| | 49 | | 54.5 | | 56 |
| | 51 | | 57 | | 57 |
| | 53.5 | | 58.5 | | 56.5 |
| | 52.5 | | 53.5 | | 56 |
| | 52 | | 51 | | 56 |
| | 52 | | 53 | | 55 |
| | 51 | | 58 | | 56 |
| | 52 | | 45 | | 56 |
| | 50.5 | | 54 | | 53 |
| | 49.5 | | 49.5 | | 50.5 |
| | 51.5 | | 51.5 | | 53 |
| | 51.5 | | 50.5 | | 53.5 |
| | 52.5 | | 48.5 | | 55 |
| | 54 | | 54.5 | | 53.5 |
| | 52.5 | | 50 | | 53.5 |
| | 54 | | 56.5 | | 55.5 |
| | 52.5 | | 52 | | 56 |
| | 50.5 | | 52 | | 55 |
| | 50 | | 56 | | 53.5 |
| | 51 | | 54.5 | | 55.5 |
| | 52 | | 52.5 | | 59 |
| | 53 | | 57.5 | | 60 |
| | 51 | | 54 | | 58 |
| | 52.5 | | 58 | | 59.5 |
| | 49.5 | | 54 | | 58.5 |
| | 50 | | 53 | | 56.5 |
| | 48 | | 49.5 | | 54 |
| | 49 | | 47 | | 52 |
| | 50 | | 53 | | 53 |
| | 54 | | 47 | | 53.5 |
| | 52 | | 54 | | 55 |
| | 52.5 | | 55.5 | | 56 |
| | 54 | | 52 | | 56.5 |
| | 52.5 | | 48 | | 55 |

2. Результати розрахунків:

2.1. коефіцієнт гомогенності.

Вейбулла для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$$m1 = 37.2356$$

2.2. коефіцієнт гомогенності.

Вейбулла після чорнового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$$m2 = 17.3703$$

2.3. коефіцієнт гомогенності.

Вейбулла після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$$m3 = 29.7714$$

1.10. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 5, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 5, плавка 2

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|------|------|------|
| 55 | 51 | 57 |
| 58 | 53 | 59.5 |
| 55.5 | 58 | 59.5 |
| 58 | 58.5 | 60 |
| 61 | 60.5 | 60 |
| 58 | 59 | 61 |
| 58 | 58 | 59.5 |
| 55.5 | 58.5 | 60 |
| 56.5 | 58 | 57.5 |
| 58.5 | 59 | 59 |
| 56 | 54 | 59 |
| 56.5 | 56 | 61.5 |
| 57 | 57.5 | 60 |
| 58 | 53.5 | 61 |
| 50 | 56 | 60 |
| 59.5 | 57 | 59.5 |
| 59 | 55.5 | 59.5 |
| 58 | 54.5 | 61 |
| 57.5 | 59.5 | 61 |
| 57 | 55 | 55.5 |
| 52 | 65 | 59 |
| 60.5 | 59 | 59 |
| 59 | 62 | 61 |
| 58.5 | 61 | 59 |
| 58 | 61 | 60 |
| 57 | 53 | 59.5 |
| 55 | 50.5 | 58 |
| 56.5 | 59.5 | 55 |
| 55 | 59.5 | 58 |
| 57.5 | 60 | 55.5 |
| 56.5 | 61.5 | 57.5 |
| 53 | 57 | 60.5 |
| 56 | 59 | 59 |
| 57.5 | 57.5 | 58.5 |
| 55 | 53.5 | 56.5 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла для вхідної заготовки ($m1$)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$$m1 = 28.3175$$

2.2. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після чорнового фрезерування ($m2$)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$$m2 = 19.8454$$

2.3. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після чистового фрезерування ($m3$)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$$m3 = 39.6947$$

2. Аналіз структури технологічного маршруту: заготовка – напівчистове фрезерування – чистове фрезерування для виливок із алюмінієвого сплаву АК

2.1. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 1, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 1, плавка 1

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | | | |
|----------|------|----------|------|----------|------|
| $H1i :=$ | 55 | $H2i :=$ | 57.5 | $H3i :=$ | 54.5 |
| | 59 | | 57 | | 57 |
| | 55 | | 59 | | 60.5 |
| | 57 | | 61 | | 59 |
| | 52.5 | | 60 | | 58.5 |
| | 55.5 | | 58.5 | | 59.5 |
| | 53.5 | | 58 | | 59.5 |
| | 53 | | 58.5 | | 60.5 |
| | 59 | | 59 | | 60 |
| | 55.5 | | 60 | | 60 |
| | 58 | | 58.5 | | 58.5 |
| | 54 | | 60 | | 60 |
| | 56 | | 59 | | 57.5 |
| | 50.5 | | 56 | | 58 |
| | 54 | | 56.5 | | 60.5 |
| | 54.5 | | 60.5 | | 59 |
| | 53 | | 60.5 | | 58 |
| | 56.5 | | 57 | | 61.5 |
| | 48 | | 57.5 | | 60 |
| | 57 | | 61.5 | | 62 |
| | 52 | | 63 | | 61.5 |
| | 52.5 | | 61 | | 60 |
| | 56.5 | | 59.5 | | 60 |
| | 56 | | 59 | | 60.5 |
| | 55 | | 59.5 | | 61 |
| | 55 | | 59.5 | | 62 |
| | 56.5 | | 58.5 | | 61 |
| | 55.5 | | 60 | | 58 |
| | 56.5 | | 55 | | 62 |
| | 55.5 | | 59 | | 61.5 |
| | 55.5 | | 59 | | 57 |
| | 56 | | 61 | | 58 |
| | 54.5 | | 59.5 | | 58.5 |
| | 55 | | 60.5 | | 60 |
| | 60.5 | | 56 | | 59.5 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 25.5746$

2.2. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після напівчистового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 38.5039$

2.3. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 39.777$

2.2. Розрахунок коефіцієнта t для заготовки 1, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 1, плавка 2

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | | | |
|-------------|------|------|------|
| $H_{1i} :=$ | 48 | 55 | 57 |
| | 54 | 56 | 59.5 |
| | 56.5 | 55.5 | 58.5 |
| | 53 | 57.5 | 60.5 |
| | 52 | 61 | 59.5 |
| | 53 | 58.5 | 57.5 |
| | 54 | 58 | 60 |
| | 53 | 55.5 | 55.5 |
| | 50 | 54 | 54 |
| | 41 | 50 | 57 |
| | 43.5 | 50 | 52.5 |
| | 43 | 52 | 54 |
| | 47 | 55 | 57.5 |
| | 58 | 56 | 58.5 |
| | 54 | 57 | 58.5 |
| | 58 | 56.5 | 62 |
| | 57 | 59.5 | 60 |
| | 58.5 | 52 | 58 |
| | 52.5 | 56 | 57.5 |
| | 53.5 | 57.5 | 59 |
| | 50.5 | 59 | 62 |
| | 54 | 57.5 | 59 |
| | 54.5 | 59 | 58.5 |
| | 54 | 58.5 | 57 |
| | 52 | 54 | 56.5 |
| | 49 | 54 | 53 |
| | 48 | 57 | 55 |
| | 41 | 56 | 57 |
| | 41 | 57.5 | 56.5 |
| | 47.5 | 57 | 59 |
| | 51 | 57 | 59.5 |
| | 48.5 | 57 | 61 |
| | 58.5 | 54.5 | 60 |
| | 55 | 53.5 | 58 |
| | 53 | 55 | 58.5 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла для вхідної заготовки (m_1)

$$m_1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{1i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{1i}) \right) \right]^2}}$$

$$m_1 = 11.11$$

2.2. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після напівчистового фрезерування (m_2)

$$m_2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{2i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{2i}) \right) \right]^2}}$$

$$m_2 = 24.7909$$

2.3. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після чистового фрезерування (m_3)

$$m_3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{3i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{3i}) \right) \right]^2}}$$

$$m_3 = 27.9228$$

2.3. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 2, плавки 1

1. Вхідні дані -- заготовка 2, плавка 1

1.1. Вид (обробки) -- заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| $H_{1i} :=$ | $H_{2i} :=$ | $H_{3i} :=$ |
| 54 | 50.5 | 56.5 |
| 53.5 | 56 | 60.5 |
| 55 | 54.5 | 59.5 |
| 54 | 56 | 59.5 |
| 52.5 | 56 | 60 |
| 53.5 | 55.5 | 62 |
| 57 | 56 | 62.5 |
| 53 | 57.5 | 60 |
| 52.5 | 60 | 61.5 |
| 54 | 56.5 | 60.5 |
| 51.5 | 58 | 62.5 |
| 53.5 | 57.5 | 61.5 |
| 56.5 | 57 | 60 |
| 55 | 58 | 60 |
| 47.5 | 57.5 | 61.5 |
| 52 | 55 | 61 |
| 53 | 57 | 59.5 |
| 54.5 | 55.5 | 58 |
| 52 | 55 | 59 |
| 54 | 56 | 59 |
| 56.5 | 57 | 59 |
| 54 | 57 | 58 |
| 53.5 | 58.5 | 60 |
| 53 | 56 | 60 |
| 54.5 | 56.5 | 63.5 |
| 55 | 56 | 62.5 |
| 53.5 | 55 | 61 |
| 54.5 | 57 | 59.5 |
| 52.5 | 56 | 62.5 |
| 52.5 | 57 | 58.5 |
| 54.5 | 56.5 | 61.5 |
| 58.5 | 56.5 | 57 |
| 53.5 | 57 | 60 |
| 54 | 58 | 60 |
| 51.5 | 55 | 61.5 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбулда для вхідної заготовки (m_1)

$$m_1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{1i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{1i}) \right) \right]^2}}$$

$$m_1 = 32.0707$$

2.2. коефіцієнт гомогенності

Вейбулда після напівчистового фрезерування (m_2)

$$m_2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{2i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{2i}) \right) \right]^2}}$$

$$m_2 = 40.6047$$

2.3. коефіцієнт гомогенності

Вейбулда після чистового фрезерування (m_3)

$$m_3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{3i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{3i}) \right) \right]^2}}$$

$$m_3 = 42.0712$$

2.4. Розрахунок коефіцієнта *m* для заготовки 2, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 2, плавка 2

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | | |
|------|------|------|
| 53 | 56 | 59.5 |
| 56 | 57.5 | 58.5 |
| 55 | 59.5 | 58 |
| 50.5 | 57 | 57.5 |
| 54 | 59.5 | 61 |
| 53 | 56.5 | 60 |
| 51 | 57.5 | 61.5 |
| 58 | 57.5 | 57 |
| 53 | 58 | 60 |
| 57 | 56 | 57 |
| 50.5 | 55.5 | 58 |
| 56 | 56.5 | 57.5 |
| 56 | 57.5 | 58 |
| 53.5 | 55.5 | 58 |
| 53.5 | 56.5 | 59 |
| 55 | 55 | 59.5 |
| 53.5 | 55 | 56.5 |
| 52 | 55 | 57 |
| 52.5 | 56.5 | 58 |
| 57.5 | 58.5 | 59 |
| 54 | 59 | 59.5 |
| 57 | 56 | 61.5 |
| 52.5 | 55.5 | 61 |
| 51.5 | 56.5 | 60 |
| 56.5 | 56 | 62 |
| 54 | 56 | 60.5 |
| 54 | 52 | 60.5 |
| 52 | 55.5 | 58.5 |
| 56 | 55.5 | 59.5 |
| 54 | 57.5 | 58.5 |
| 54 | 57 | 61 |
| 54.5 | 56.5 | 59.5 |
| 53 | 56 | 58 |
| 52 | 59 | 57.5 |
| 52 | 55.5 | 57 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла для вхідної заготовки ($m1$)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 30.5807$

2.2. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після напівчистового фрезерування ($m2$)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 42.3729$

2.3. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після чистового фрезерування ($m3$)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 44.0696$

2.5. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 3, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 3, плавка 1

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | | | |
|--------|------|--------|------|--------|------|
| H1i := | 49.5 | H2i := | 54 | H3i := | 54.5 |
| | 51 | | 56 | | 58 |
| | 50 | | 56 | | 54.5 |
| | 49 | | 53 | | 57.5 |
| | 46.5 | | 53.5 | | 56.5 |
| | 50 | | 54.5 | | 54.5 |
| | 49 | | 50 | | 56.5 |
| | 51.5 | | 54 | | 56 |
| | 48.5 | | 54.5 | | 57 |
| | 49 | | 52.5 | | 54 |
| | 49 | | 53.5 | | 57 |
| | 49 | | 53 | | 55 |
| | 49 | | 51 | | 53.5 |
| | 49 | | 54.5 | | 53 |
| | 49.5 | | 53.5 | | 52 |
| | 52 | | 54 | | 52.5 |
| | 49 | | 52 | | 53.5 |
| | 49 | | 48.5 | | 56.5 |
| | 50 | | 52.5 | | 59.5 |
| | 49 | | 54 | | 56.5 |
| | 52 | | 55 | | 57 |
| | 50 | | 58 | | 54.5 |
| | 52 | | 55 | | 56 |
| | 47 | | 54 | | 57.5 |
| | 48 | | 52.5 | | 51 |
| | 53.5 | | 54.5 | | 54 |
| | 48.5 | | 54 | | 54 |
| | 49 | | 56 | | 56 |
| | 52.5 | | 58 | | 53 |
| | 49.5 | | 55.5 | | 54 |
| | 49 | | 53.5 | | 55 |
| | 47 | | 53 | | 56.5 |
| | 49 | | 54 | | 54.5 |
| | 49.5 | | 54 | | 55.5 |
| | 50 | | 55 | | 55.5 |
| | 46 | | 55 | | 55.5 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбул्ला для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 34.0225$

2.2. коефіцієнт гомогенності Вейбул्ला після напівчистового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 32.1054$

2.3. коефіцієнт гомогенності Вейбул्ला після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 33.6387$

2.6. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 3, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 3, плавка 2

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | |
|------|------|------|
| 45 | 49 | 54 |
| 46 | 54.5 | 55.5 |
| 48.5 | 52 | 54.5 |
| 48.5 | 51.5 | 57 |
| 47 | 52 | 56.5 |
| 46.5 | 49.5 | 57.5 |
| 52 | 52 | 57.5 |
| 46.5 | 52.5 | 55 |
| 46.5 | 49.5 | 54 |
| 47 | 53.5 | 52.5 |
| 46 | 50.5 | 52.5 |
| 47 | 51.5 | 52.5 |
| 49 | 53.5 | 54.5 |
| 43.5 | 51.5 | 52 |
| 46.5 | 51.5 | 57 |
| 47 | 54 | 56 |
| 48.5 | 52.5 | 54 |
| 45 | 56.5 | 56.5 |
| 44.5 | 50 | 56 |
| 49.5 | 53 | 57 |
| 47.5 | 54.5 | 56.5 |
| 49 | 51 | 55.5 |
| 48.5 | 51.5 | 54 |
| 55 | 54.5 | 55 |
| 46.5 | 53 | 54 |
| 51.5 | 54 | 57 |
| 45 | 50.5 | 54 |
| 48.5 | 53.5 | 54.5 |
| 47.5 | 52 | 56 |
| 49.5 | 52.5 | 53.5 |
| 49 | 52.5 | 54.5 |
| 48 | 51.5 | 55 |
| 48.5 | 53 | 54 |
| 48 | 54.5 | 55 |
| 48 | 49 | 57 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$$m1 = 24.7682$$

2.2. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла після напівчистового
фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$$m2 = 35.0769$$

2.3. коефіцієнт гомогенності
Вейбулла після чистового
фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$$m3 = 40.2632$$

2.7. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 4, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 4, плавка 1

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | | | |
|----------|------|----------|------|----------|------|
| $H1i :=$ | 51.5 | $H2i :=$ | 56 | $H3i :=$ | 56.5 |
| | 53.5 | | 55 | | 57 |
| | 51.5 | | 56.5 | | 59 |
| | 58 | | 58.5 | | 56.5 |
| | 55 | | 59 | | 57 |
| | 53 | | 58 | | 54 |
| | 55 | | 57.5 | | 54.5 |
| | 50 | | 56 | | 54.5 |
| | 48 | | 54.5 | | 60 |
| | 46 | | 56.5 | | 57.5 |
| | 50.5 | | 54 | | 60 |
| | 51.5 | | 53 | | 57.5 |
| | 47.5 | | 55 | | 57 |
| | 54 | | 53 | | 57.5 |
| | 53.5 | | 55 | | 57.5 |
| | 54 | | 55.5 | | 56 |
| | 56 | | 57 | | 57 |
| | 53 | | 55 | | 57.5 |
| | 53.5 | | 55.5 | | 57.5 |
| | 50 | | 52.5 | | 57 |
| | 55 | | 55.5 | | 57.5 |
| | 55 | | 55.5 | | 57.5 |
| | 55 | | 55 | | 57 |
| | 53 | | 57.5 | | 55 |
| | 55.5 | | 58 | | 55 |
| | 52 | | 56.5 | | 57 |
| | 53 | | 54.5 | | 60 |
| | 50.5 | | 54.5 | | 53 |
| | 50 | | 54.5 | | 53 |
| | 52 | | 53.5 | | 55 |
| | 49 | | 54.5 | | 55 |
| | 56 | | 55 | | 59 |
| | 55 | | 57.5 | | 57.5 |
| | 54 | | 58 | | 57.5 |
| | 53 | | 59 | | 57.5 |
| | 54 | | 54 | | 57 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбуллада для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$$m1 = 22.1129$$

2.2. коефіцієнт гомогенності

Вейбуллада після напівчистового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$$m2 = 35.9313$$

2.3. коефіцієнт гомогенності

Вейбуллада після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$$m3 = 35.9842$$

2.8. Розрахунок коефіцієнта t для заготовки 4, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 4, плавка 2

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | | | |
|--------|------|--------|------|--------|------|
| H1i := | 41 | H2i := | 55 | H3i := | 61 |
| | 59 | | 54 | | 61 |
| | 50 | | 55.5 | | 57 |
| | 51 | | 55.5 | | 56 |
| | 48 | | 51.5 | | 54.5 |
| | 49.5 | | 51.5 | | 54 |
| | 52 | | 51 | | 54.5 |
| | 53 | | 51 | | 52.5 |
| | 54 | | 53 | | 51.5 |
| | 52 | | 54 | | 55.5 |
| | 50 | | 54 | | 53.5 |
| | 44 | | 55 | | 55.5 |
| | 53.5 | | 56 | | 56 |
| | 54.5 | | 51.5 | | 55.5 |
| | 52.5 | | 54.5 | | 59.5 |
| | 54 | | 55 | | 54 |
| | 56.5 | | 58 | | 54.5 |
| | 53.5 | | 54 | | 55.5 |
| | 49.5 | | 55 | | 56 |
| | 51 | | 57.5 | | 56 |
| | 50.5 | | 55 | | 57 |
| | 51.5 | | 55.5 | | 55.5 |
| | 50.5 | | 49 | | 56 |
| | 45 | | 50.5 | | 56 |
| | 50 | | 51.5 | | 54 |
| | 50.5 | | 53 | | 55.5 |
| | 52.5 | | 52 | | 56 |
| | 52 | | 53 | | 57 |
| | 54 | | 53 | | 55 |
| | 51.5 | | 55 | | 59 |
| | 55.5 | | 56 | | 57 |
| | 52 | | 53.5 | | 55 |
| | 55 | | 55.5 | | 55.5 |
| | 54 | | 56 | | 56.5 |
| | 55 | | 56.5 | | 59 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$m1 = 16.181$

2.2. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після напівчистового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$m2 = 28.747$

2.3. коефіцієнт гомогенності

Вейбулла після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$m3 = 30.808$

2.9. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 5, плавки 1

1. Вхідні дані - заготовка 5, плавка 1.

1.1. Вид (обробки) - заготовка.

1.2. Кількість вимірювань: $n = 35$

| | | | |
|--|--|--|---|
| $H_{1i} := \begin{pmatrix} 51 \\ 54 \\ 54.5 \\ 53 \\ 53 \\ 52 \\ 51.5 \\ 52.5 \\ 52 \\ 52 \\ 50.5 \\ 50.5 \\ 52 \\ 52.5 \\ 51.5 \\ 51 \\ 53 \\ 53.5 \\ 53 \\ 53.5 \\ 52 \\ 57.5 \\ 52 \\ 52 \\ 52.5 \\ 51.5 \\ 49.5 \\ 49 \\ 51 \\ 50 \\ 48.5 \\ 53 \\ 54 \\ 54 \\ 53.5 \end{pmatrix}$ | $H_{2i} := \begin{pmatrix} 56 \\ 55 \\ 56.5 \\ 58.5 \\ 59 \\ 58 \\ 57.5 \\ 56 \\ 54.5 \\ 56.5 \\ 54 \\ 53 \\ 55 \\ 53 \\ 55 \\ 55.5 \\ 57 \\ 55 \\ 52.5 \\ 55.5 \\ 55.5 \\ 55 \\ 57.5 \\ 58 \\ 56.5 \\ 54.5 \\ 54.5 \\ 54.5 \\ 53.5 \\ 54.5 \\ 55 \\ 57.5 \\ 58 \\ 58 \\ 59 \\ 54 \end{pmatrix}$ | $H_{3i} := \begin{pmatrix} 55.5 \\ 57.5 \\ 58.5 \\ 59.5 \\ 56 \\ 57 \\ 56.5 \\ 58 \\ 58.5 \\ 57 \\ 56 \\ 56.5 \\ 57.5 \\ 59.5 \\ 55 \\ 56 \\ 57 \\ 58.5 \\ 59 \\ 60 \\ 59.5 \\ 58 \\ 58.5 \\ 60 \\ 59.5 \\ 56.5 \\ 56 \\ 56 \\ 56 \\ 57 \\ 57 \\ 58 \\ 58 \\ 58.5 \\ 57 \end{pmatrix}$ | <p>2. Результати розрахунків:</p> <p>2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла для вхідної заготовки (m1)</p> $m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{1i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{1i}) \right) \right]^2}}$ <p>$m1 = 34.5561$</p> <p>2.2. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чорнового фрезерування (m2)</p> $m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{2i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{2i}) \right) \right]^2}}$ <p>$m2 = 35.9313$</p> <p>2.3. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чистового фрезерування (m3)</p> $m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H_{3i}) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H_{3i}) \right) \right]^2}}$ <p>$m3 = 47.0778$</p> |
|--|--|--|---|

2.10. Розрахунок коефіцієнта m для заготовки 5, плавки 2

1. Вхідні дані - заготовка 4, плавка 2

1.1. Вид (обробки) - заготовка

1.2. Кількість вимірювань: $n := 35$

| | | | |
|-------------|------|------|------|
| $H_{1i} :=$ | 53 | 60 | 56.5 |
| | 57 | 61 | 59 |
| | 57.5 | 62.5 | 56 |
| | 58.5 | 61 | 59.5 |
| | 58 | 60.5 | 61 |
| | 56 | 60.5 | 60 |
| | 55.5 | 59 | 59.5 |
| | 55.5 | 57 | 62 |
| | 54 | 56.5 | 59 |
| | 51 | 53 | 59.5 |
| | 50 | 57 | 60 |
| | 54 | 58 | 61.5 |
| | 54 | 61 | 62 |
| | 56.5 | 61 | 63.5 |
| | 57 | 62 | 63 |
| | 58 | 61 | 63.5 |
| | 58.5 | 60 | 60.5 |
| | 56.5 | 57 | 60 |
| | 56 | 57.5 | 60 |
| | 58.5 | 61.5 | 58.5 |
| | 57.5 | 56 | 61 |
| | 56.5 | 60.5 | 61.5 |
| | 58.5 | 58.5 | 61.5 |
| | 49.5 | 59 | 62.5 |
| | 53.5 | 58 | 61 |
| | 56 | 55 | 61 |
| | 52.5 | 60.5 | 62 |
| | 53.5 | 59 | 62.5 |
| | 49.5 | 60 | 61 |
| | 55.5 | 59.5 | 61.5 |
| | 56 | 60.5 | 56 |
| | 59 | 59 | 61 |
| | 58 | 58 | 60 |
| | 57 | 57.5 | 59 |
| | 55.5 | 57 | 59 |

2. Результати розрахунків

2.1. коефіцієнт гомогенності Вейбулла для вхідної заготовки (m1)

$$m1 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H1i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H1i) \right) \right]^2}}$$

$$m1 = 23.13$$

2.2. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чорнового фрезерування (m2)

$$m2 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H2i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H2i) \right) \right]^2}}$$

$$m2 = 30.956$$

2.3. коефіцієнт гомогенності Вейбулла після чистового фрезерування (m3)

$$m3 := \frac{1.1284}{2.30259 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sum \left[\log(H3i) - \frac{1}{n} \left(\sum \log(H3i) \right) \right]^2}}$$

$$m3 = 36.1753$$

Технологічний процес механічного оброблення деталі «Корпус редуктора К 02.106»

| № операції | Назва операції та зміст переходів | Елементи технологічної системи системи ВПД(З) | | | Основний час, хв | | | |
|------------|--|---|------------------------|---------------------|------------------|---------------------------|------------------------------|------|
| | | Верстат | Інструмент | Оснащення | по переходах | на технологічній операції | | |
| 005 | Горизонтально-фрезерна Фрезерувати базову площину 1. | 6P82 | Фреза 2214-0161 BK8 | Пристрій 7222-7303 | 1.48 | 1.48 | | |
| 010 | Радіально-свердлильна | 2H55 | | Кондуктор 7347-7331 | | 4.71 | | |
| | 1. Свердлити послідовно два отв. напрохід в розмір $\varnothing 17^{+0.4}$ мм. | | | | | | Свердло 2301-0057 | 0.6 |
| | 2. Свердлити послідовно два отв. напрохід в розмір $\varnothing 16,5^{+0.2}$ мм. | | | | | | Свердло 2301-0056 | 0.6 |
| | 3. Свердлити послідовно шість отв. випримоючи $\varnothing 5^{+0.1}$ мм. | | | | | | Свердло 2300-6173 | 1.9 |
| | 4. Розвернути послідовно два отв. напрохід в розмір $\varnothing 17H9$ мм. | | | | | | Розвертка $\varnothing 17H9$ | 0.35 |
| | 5. Зенкувати послідовно 6 фасок $1 \times 45^\circ$ в отворах. | | | | | | Свердло 2300-0203 | 0.2 |
| | 6. Нарізати послідовно різь М6-6H в 6 отворах. | | | | | | Мітчик 2621-1155 | 1.06 |
| 015 | Горизонтально-фрезерна Фрезерувати бічну площину корпусу. | 6P82 | Фреза 2214-0159 BK8 | Пристрій 7222-7305 | 1.32 | 1.32 | | |
| 015 | Горизонтально-фрезерна Фрезерувати протилежну бічну площину корпусу. | 6P82 | Фреза 2214-0157 BK8 | Пристрій 7222-7305 | 1.10 | 1.10 | | |

Продовження дод. Ж

| № операції | Назва операції та зміст переходів | Елементи технологічної системи системи ВПД(З) | | | Основний час, хв | |
|------------|--|---|------------------------------|---------------------|------------------|---------------------------|
| | | Верстат | Інструмент | Оснащення | по переходах | на технологічній операції |
| 025 | Токарно-гвинторізна | 163 | | Пристрій 7137-7301 | | 8.51 |
| | 1. Розточити отв. напрохід в $\varnothing 145^{+0.15}$ мм. | | Різець 2142-4103 | | 2.76 | |
| | 2. Розточити фаску $2 \times 45^\circ$. | | Різець 2142-4103 | | 0.2 | |
| | 3. Розточити отв. попередньо напрохід в розмір $\varnothing 79.7^{+0.1}$ мм. | | Різець 2142-4103 | | 3.69 | |
| | 4. Розточити фаску $2 \times 45^\circ$. | | Різець 2142-4103 | | 0.16 | |
| | 5. Розвернути отв. кінцево напрохід в розмір $\varnothing 80H7$ мм. | | Розвертка $\varnothing 80H7$ | | 1.7 | |
| 030 | Токарно-гвинторізна | 163 | | Пристрій 7137-7301 | | 3.32 |
| | 1. Розточити отв. напрохід в $\varnothing 110^{+0.14}$ мм. | | Різець 2142-4103 | | 3.16 | |
| | 2. Розточити фаску $2 \times 45^\circ$. | | Різець 2142-4103 | | 0.16 | |
| 035 | Радіально-свердлильна | 2H55 | | Кондуктор 7362-7307 | | 3.62 |
| | 1. Свердлити послідовно вісім отв. в розмір $\varnothing 6.7^{+0.2}$ мм. | | Свердло 2300-0186 | | 2.6 | |
| | 2. Зенкувати послідовно фаски $1.6 \times 45^\circ$ у 8 отворах. | | Свердло 2301-0039 | | 0.2 | |
| | 3. Нарізати послідовно різь М8-6Н в 8 отворах. | | Мітчик 2621-2531 | 0.82 | | |

Продовження дод. Ж

| № операції | Назва операції та зміст переходів | Елементи технологічної системи системи ВПД(З) | | | Основний час, хв | |
|------------|---|---|-------------------|---------------------|------------------|---------------------------|
| | | Верстат | Інструмент | Оснащення | по переходах | на технологічній операції |
| 040 | Радіально-свердлильна | 2Н55 | | Кондуктор 7362-7306 | | 1.81 |
| | 1. Свердлити послідовно чотири отв. в розмір $\varnothing 6.7^{+0.2}$ мм. | | Свердло 2300-0186 | | 1.3 | |
| | 2. Зенкувати послідовно фаски $1.6 \times 45^\circ$ в 4 отворах. | | Свердло 2301-0039 | | 0.1 | |
| | 3. Нарізати послідовно різь М8-6Н в 4 отворах. | | Мітчик 2621-2531 | | 0.41 | |
| 045 | Радіально-свердлильна | 2Н55 | | Кондуктор 7362-7305 | | 2.20 |
| | 1. Свердлити послідовно чотири отв. в розмір $\varnothing 8.5^{+0.2}$ мм. | | Свердло 2300-0200 | | 1.65 | |
| | 2. Зенкувати послідовно фаски $1.6 \times 45^\circ$ у 8 отворах. | | Свердло 2301-0046 | | 0.10 | |
| | 3. Нарізати послідовно різь М8-6Н в 8 отворах. | | Мітчик 2621-2595 | | 0.45 | |

Продовження дод. Ж

| № операції | Назва операції та зміст переходів | Елементи технологічної системи системи ВПД(З) | | | Основний час, хв | |
|---------------------------|---|---|--------------------|---------------------|------------------|---------------------------|
| | | Верстат | Інструмент | Оснащення | по переходах | на технологічній операції |
| 050 | Радіально-свердлильна | 2Н55 | | Кондуктор 7362-7306 | | 1.53 |
| | 1. Свердлити отв. напрохід в розмір $\varnothing 10.2^{+0.2}$ мм. | | Свердло 2301-0030 | | 0.23 | |
| | 2. Цекувати отв. в розмір $\varnothing 20^{+0.4}$ мм. | | Цековка 20×10.2 | | 0.12 | |
| | 3. Зенкувати фаску $1.6 \times 45^\circ$ в отворі. | | Зенківка Р-1667-10 | | 0.06 | |
| | 4. Нарізати різь М12-6Н в отворі. | | Мітчик 2620-1513 | | 0.10 | |
| | 5. Свердлити отв. напрохід в розмір $\varnothing 10.2^{+0.2}$ мм. | | Свердло 2301-0030 | | 0.23 | |
| | 6. Цекувати отв. в розмір $\varnothing 20^{+0.4}$ мм. | | Цековка 20×10.2 | | 0.12 | |
| | 7. Зенкувати фаску $1.6 \times 45^\circ$ в отворі. | | Зенківка Р-1667-10 | | 0.06 | |
| | 8. Нарізати різь М12-6Н в отворі. | | Мітчик 2620-1513 | | 0.10 | |
| | 9. Свердлити отв. напрохід в розмір $\varnothing 10.2^{+0.2}$ мм. | | Свердло 2301-0030 | | 1.53 | |
| | 10. Цекувати отв. в розмір $\varnothing 20^{+0.4}$ мм. | | Цековка 20×10.2 | | 0.23 | |
| | 11. Зенкувати фаску $1.6 \times 45^\circ$ в отворі. | | Зенківка Р-1667-10 | | 0.12 | |
| 12. Нарізати різь М12-6Н. | Мітчик 2620-1513 | | | | | |

Аналіз технологічних операцій і технологічних переходів при механічному
обробленні деталі «Корпус редуктора К 02.106»

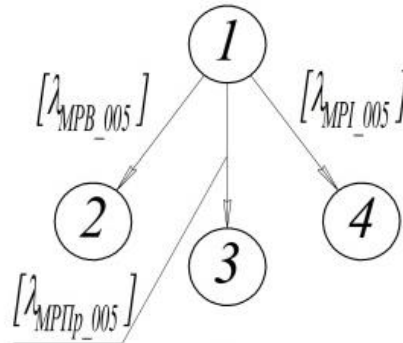


Рис.1. Технологічний граф надійності для операції 005 Горизонтально-фрезерна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 005 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 1):

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_005} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_005} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_005} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_005} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_005} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_005} \cdot P_1(t), \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) &= 1, \quad t \in [0; t] \end{aligned} \quad (1)$$

де λ_{MPB_005} , λ_{MIP_005} , λ_{MPI_005} – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізального інструмента на операції 005 ТП виготовлення корпусу редуктора.

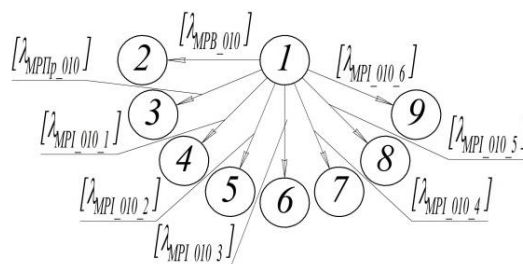


Рис. 2. Технологічний граф надійності для операції 010 Радіально-свердлильна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 010 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 2):

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_010} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPP_010} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_010_1} \cdot P_1(t) - \\
 &\lambda_{MPI_010_2} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_010_3} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_010_4} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_010_5} \cdot P_1(t) - \\
 &\lambda_{MPI_010_6} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_010} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MPP_010} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_1} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_2} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_3} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_7(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_4} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_8(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_5} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_9(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_010_6} \cdot P_1(t), \\
 P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) + P_9(t) &= 1,
 \end{aligned} \tag{2}$$

де λ_{MPB_010} , λ_{MPP_010} , $\lambda_{MPI_010_1}$, $\lambda_{MPI_010_2}$, $\lambda_{MPI_010_3}$, $\lambda_{MPI_010_4}$, $\lambda_{MPI_010_5}$, $\lambda_{MPI_010_6}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізальних інструментів № 1-№ 6 (за порядком виконання технологічного процесу) на операції 010 ТП виготовлення корпусу редуктора.

Розв'язок основного диференціального рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned}
 P_1(t) &= e^{-(\lambda_{MPB_010} + \lambda_{MPP_010})t} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_1} \cdot t'} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_2} \cdot t''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_3} \cdot t'''} \times \\
 &\times e^{-\lambda_{MPI_010_4} \cdot t''''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_5} \cdot t'''''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_6} \cdot t''''''} + C_1,
 \end{aligned}$$

При $P_1(t=0) = 1$ $C_1 = 0$:

$$P_1(t) = e^{-(\lambda_{MPB_010} + \lambda_{MPP_010})t} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_1}t'} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_2}t''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_015_3}t'''} \times \\ \times e^{-\lambda_{MPI_010_4}t''''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_5}t'''''} \cdot e^{-\lambda_{MPI_010_6}t''''''},$$

Після підстановки значень отримаємо:

$$P_1(t) = e^{-(1.584410^{-7} + 1.11111110^{-5})t} \cdot e^{-0.022222t'} \cdot e^{-0.022222t''} \cdot e^{-0.066667t'''} \cdot e^{-0.022222t''''} \times \\ \times e^{-0.04t'''''} \cdot e^{-0.011111t''''''}$$

$t \in [0; t]; t' \in [0; t_1]; t'' \in [t_1; t_2]; t''' \in [t_2; t_3]; t'''' \in [t_3; t_4]; t'''''' \in [t_4; t_5]; t'''''''' \in [t_5; t_6]$.

Згідно дод. Ж для операції 010 встановлюємо граничні значення для інтервалу часу: $t \in [0; 4,71]; t' \in [0; 0,6]; t'' \in [0,6; 1,2]; t''' \in [1,2; 3,1]; t'''' \in [3,1; 3,45]; t'''''' \in [3,45; 3,65]; t'''''''' \in [3,65; 4,71]$.

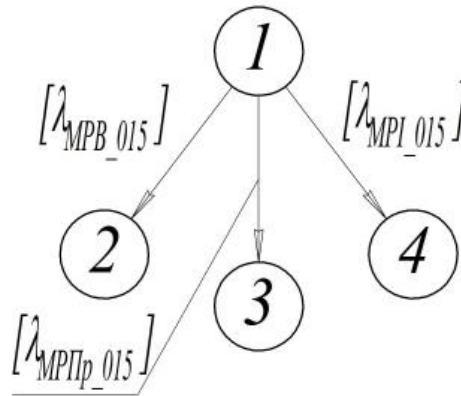


Рис. 3. Технологічний граф надійності для операції 015 Горизонтально-фрезерна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 015 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 3):

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_015} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPP_015} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_015} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_015} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MPP_015} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_015} \cdot P_1(t), \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) &= 1, \end{aligned} \quad (3)$$

де λ_{MPB_015} , λ_{MIP_015} , λ_{MPI_015} – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізального інструмента на операції 015 ТП виготовлення корпусу редуктора.

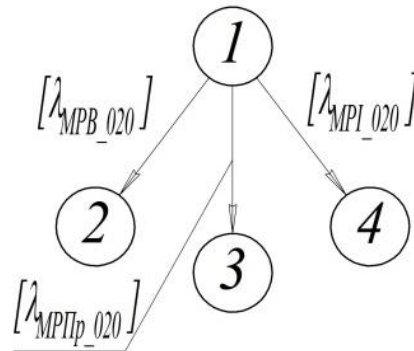


Рис. 4. Технологічний граф надійності для операції 020 Горизонтально-фрезерна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 020 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 4):

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_020} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_020} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_020} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_020} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_020} \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_020} \cdot P_1(t), \\ P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) &= 1, \end{aligned} \quad (4)$$

де λ_{MPB_020} , λ_{MIP_020} , λ_{MPI_020} – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізального інструмента на операції 020 ТП виготовлення корпусу редуктора.

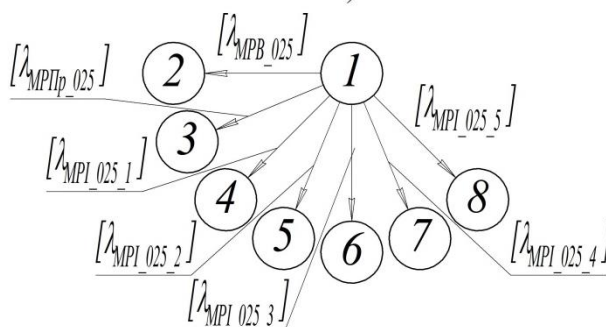


Рис. 5. Технологічний граф надійності для операції 025 Токарно-гвинторізна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 025 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 5):

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_025} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_025} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_025_1} \cdot P_1(t) - \\
 &\lambda_{MPI_025_2} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_025} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_025} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_025_1(4)} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_025_2} \cdot P_1(t), \\
 P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) &= 1,
 \end{aligned} \tag{5}$$

де λ_{MPB_025} , λ_{MIP_025} , $\lambda_{MPI_025_1(4)}$, $\lambda_{MPI_025_2}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізальних інструментів № 1, № 2 (за порядком виконання технологічного процесу) на операції 025 ТП виготовлення корпусу редуктора.

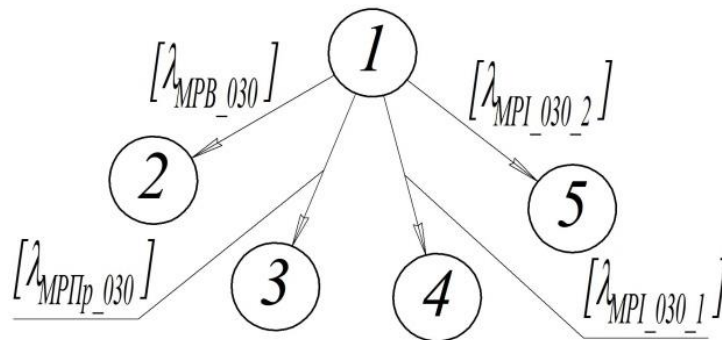


Рис. 6. Технологічний граф надійності для операції 030 Токарно-гвинторізна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 030 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 6):

$$\begin{aligned}
\frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_030} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_030} \cdot P_1(t) - \lambda_{MPI_030_1} \cdot P_1(t) - \\
&\lambda_{MPI_030_2} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_030} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_030} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_030_1} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_030_2} \cdot P_1(t), \\
P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) &= 1,
\end{aligned} \tag{6}$$

де λ_{MPB_030} , λ_{MIP_030} , $\lambda_{MPI_030_1}$, $\lambda_{MPI_030_2}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізальних інструментів № 1-№ 2 (за порядком виконання технологічного процесу) на операції 030 ТП виготовлення корпусу редуктора.

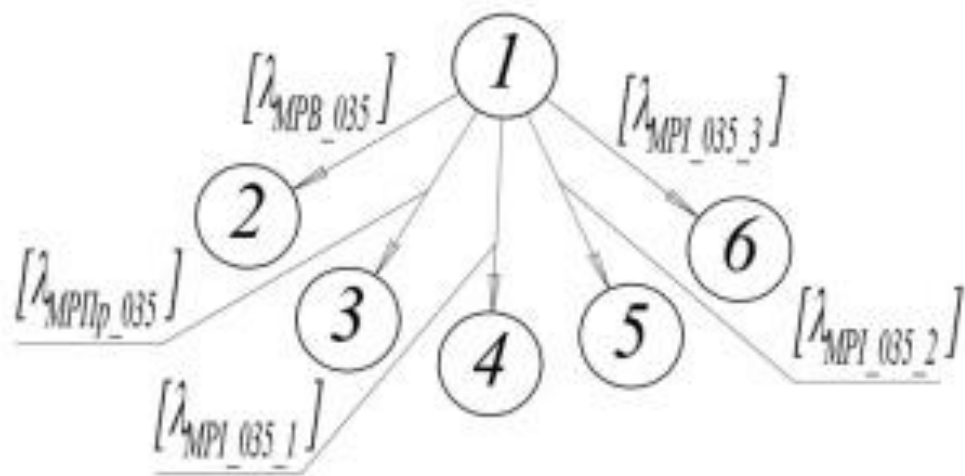


Рис. 7. Технологічний граф надійності для операції 035 Радіально-свердлильна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 035 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 7):

$$\begin{aligned}
\frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_035} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_035} \cdot P_1(t) - \sum_{k=1}^3 \lambda_{MPI_035_k} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_035} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_035} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_035_1} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_035_2} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_035_3} \cdot P_1(t), \\
P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) &= 1,
\end{aligned} \tag{7}$$

де λ_{MPB_035} , λ_{MIP_035} , $\lambda_{MPI_035_1}$, $\lambda_{MPI_035_2}$, $\lambda_{MPI_035_3}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізальних інструментів № 1-№ 3 (за порядком виконання технологічного процесу) на операції 035 ТП виготовлення корпусу редуктора.

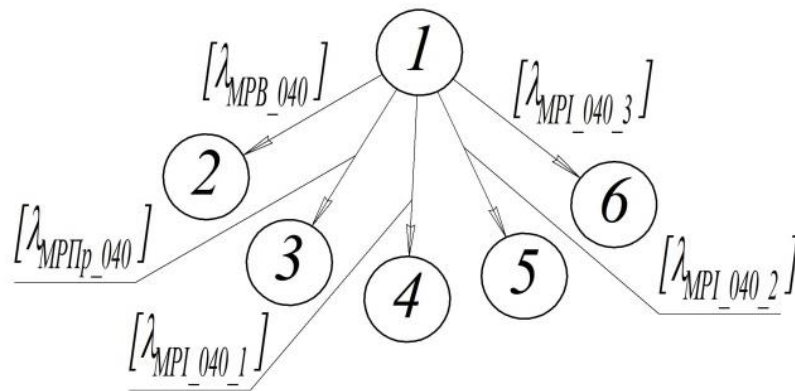


Рис. 8. Технологічний граф надійності для операції 040 Радіально-свердлильна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 040 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 8):

$$\begin{aligned}
\frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_040} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_040} \cdot P_1(t) - \sum_{k=1}^3 \lambda_{MPI_040_k} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_040} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_040} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_040_1} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_040_2} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_040_3} \cdot P_1(t), \\
P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) &= 1,
\end{aligned} \tag{8}$$

де λ_{MPB_040} , λ_{MIP_040} , $\lambda_{MPI_040_1}$, $\lambda_{MPI_040_2}$, $\lambda_{MPI_040_3}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізальних інструментів № 1-№ 3 (за порядком виконання технологічного процесу) на операції 040 ТП виготовлення корпусу редуктора.

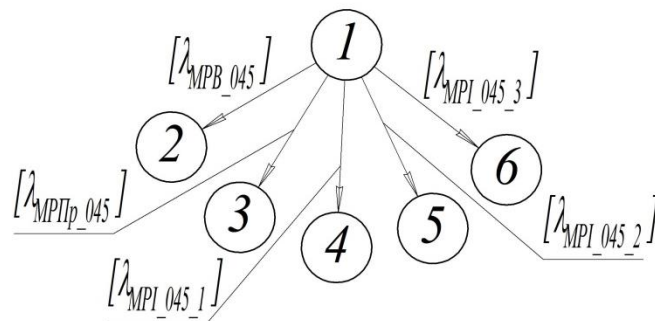


Рис. 9. Технологічний граф надійності для операції 045 Радіально-свердлильна механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 045 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 9):

$$\begin{aligned}
\frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_045} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_045} \cdot P_1(t) - \sum_{k=1}^3 \lambda_{MPI_045_k} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_045} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_045} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_045_1} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_045_2} \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_045_3} \cdot P_1(t), \\
P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) &= 1,
\end{aligned} \tag{9}$$

де λ_{MPB_045} , λ_{MIP_045} , $\lambda_{MPI_045_1}$, $\lambda_{MPI_045_2}$, $\lambda_{MPI_045_3}$ – інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізальних інструментів № 1-№ 3 (за порядком виконання технологічного процесу) на операції 045 ТП виготовлення корпуса редуктора.

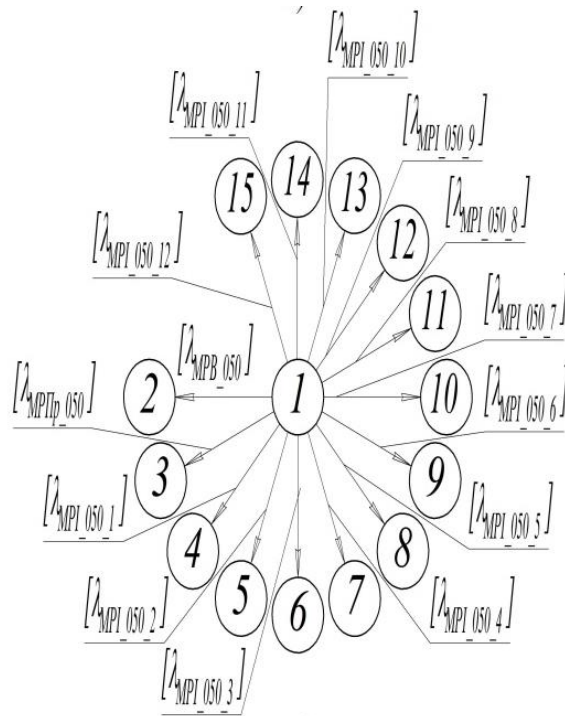


Рис. 10. Технологічний граф надійності для операції 045 Радіально-свердлильна механічного оброблення корпуса редуктора К 02.106

Система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена для технологічного графа надійності для операції 050 ТП виготовлення корпусу редуктора (рис. 10):

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\lambda_{MPB_050} \cdot P_1(t) - \lambda_{MIP_050} \cdot P_1(t) - \sum_{k=1}^{12} \lambda_{MPI_050_k} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{MPB_050} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{MIP_050} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_050_1} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_050_2} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_6(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_050_3} \cdot P_1(t), \\
 \frac{dP_7(t)}{dt} &= \lambda_{MPI_050_4} \cdot P_1(t), \\
 \sum_{i=1}^4 P_i(t) &= 1,
 \end{aligned} \tag{10}$$

де λ_{MPB_050} , λ_{MIP_050} , $\lambda_{MPI_050_1}$, $\lambda_{MPI_050_2}$, $\lambda_{MPI_050_3}$, $\lambda_{MPI_050_4}$ — інтенсивності відмов відповідно металорізального верстат, верстатного пристрою та металорізальних інструментів № 1-№ 4 (за порядком виконання технологічного процесу) на операції 050 ТП виготовлення корпусу редуктора.

Розрахунок граничних значень основного машинного часу при обробленні поверхні виробу на визначеній технологічній операції виготовлення виробу для отриманої математичної моделі забезпечення регламентованих параметрів його якості за умови недосягнення граничного стану елементів технологічного середовища: металорізального верстату, пристрою на металорізальному верстаті та металорізального інструменту.

1. Аналіз ТП виготовлення виробу з позиції надійності:

1.1. Деталь, що виготовляється - корпус редуктора К 02.106.

1.2. Технологічний процес із характеристиками елементів технологічного середовища та значень основного часу по переходах для кожної технологічної операції механічного оброблення корпуса редуктора - додаток С.

1.3. Досліджувана технологічна операція - 005 Горизонтально-фрезерна.

1.4. Кількість технологічних переходів -1.

1.6. Зміст технологічного переходу:

Фрезерувати базову площину 1.

1.7. Аналіз елементів технологічного середовища:

1.7.1. Характеристика металорізального верстату.

1.7.1.1. Модель- горизонтально-фрезерний 6Н82.

1.7.1.2. Регламентований параметр надійності металорізального верстату - середній міжремонтний період у ремонтному циклі МРВ у місяцях

$$T_{\text{МРВ_міс}} := 9 \quad \text{міс.}$$

1.7.1.3. Дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год; для двозмінного режиму роботи

$$F_{\text{дійсн}} := 4055 \quad \text{год.}$$

1.7.2. Характеристика пристрою на металорізальному верстаті.

1.7.2.1. Тип - верстатний пристрій 7222-7303.

1.7.2.2. Регламентований параметр надійності верстатного пристрою - встановлене безвідмовне напрацювання на відмову $T_{\text{Пр}}$.

$$T_{\text{Пр}} := 1500 \quad \text{год.}$$

1.7.3. Характеристика металорізального інструменту.

1.7.3.1. Вид - фреза 2214-0161 ВК8.

1.7.3.2. Регламентований параметр надійності металорізального інструменту - стійкість $T_{\text{МРІ}}$

$$\text{Для торцевих фрез} \quad T_{\text{МРІ}} := 300 \quad \text{хв.}$$

1.8. Вибір закону розподілу для опису професу формування регламентованих параметрів якості виробу і його експлуатаційних характеристик.

Для оцінки формування параметрів надійності технологічної системи ВПД(3) розглядають найжорсткіші вимоги до виробу, що забезпечується використанням експоненціального закону розподілу.

2. Побудова блок-схеми надійності для підсистеми 2 порядку (технологічного переходу) підсистеми 1 порядку (визначеної технологічної операції) технічної системи (технологічного процесу), що є підсистемою 1 порядку виробничого процесу (технічної системи).

Для операції 005 при одному технологічному переході доцільно аналізувати технічну систему на рівні підсистеми 1 порядку - технологічної операції 005 (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема надійності для технологічної операції 005 механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

3. Побудова технологічного графу надійності для підсистеми 2 порядку (технологічного переходу) підсистеми 1 порядку (визначеної технологічної операції) технічної системи (технологічного процесу), що є підсистемою 1 порядку виробничого процесу (технічної системи).

Згідно п. 2 будуємо технологічний граф надійності для рівня підсистеми 1 порядку - технологічної операції 005 (рис. 2).

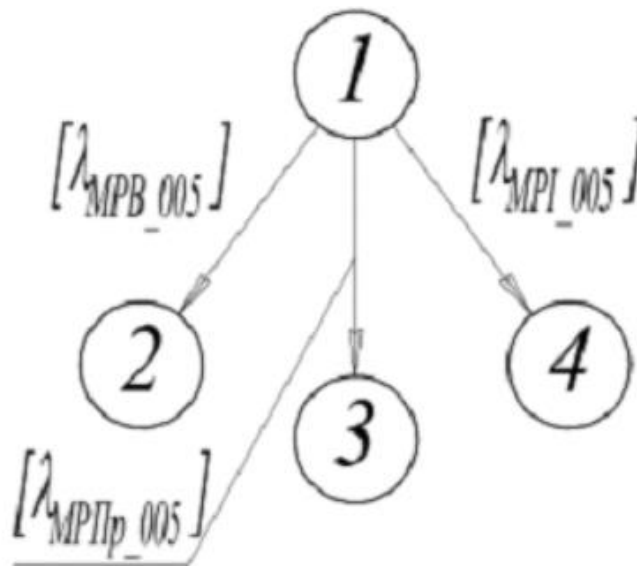


Рис. 2. Технологічний граф надійності, що описується ланцюгами Маркова, для технологічної операції 005 механічного оброблення корпусу редуктора К 02.106

4. Визначення інтенсивності відмов для елементів технологічного середовища для рівня підсистеми 1 порядку (визначеної технологічної операції) технічної системи (технологічного процесу).

4.1. Розрахунок інтенсивності відмов металорізального верстату

$$\lambda_{\text{MPB}} := \frac{1}{\left(F_{\text{дійсн}} \cdot \frac{T_{\text{MPB_mic}}}{12} \right) \cdot 60} = 5.480203 \times 10^{-6} \quad 1/\text{хв.}$$

4.2. Розрахунок інтенсивності відмов пристрою на металорізальному верстаті

$$\lambda_{\text{Пр}} := \frac{1}{T_{\text{Пр}} \cdot 60} = 1.1111 \times 10^{-5} \quad 1/\text{хв.}$$

4.3. Розрахунок інтенсивності відмов металорізального інструменту

4.3.1. Вибір коефіцієнта, що враховує частку раптових відмов МРІ,

$$K_{\text{МРІ}} := 0.75$$

$$\lambda_{\text{МРІ}} := \frac{K_{\text{МРІ}}}{T_{\text{МРІ}}} = 2.5 \times 10^{-3} \quad 1/\text{хв.}$$

5. Побудова математичної моделі для прогнозування ймовірності забезпечення регламентованих параметрів якості корпусу редуктора за умови недосягнення граничного стану МРВ, пристрою на МРВ та МРІ .

Для технологічної операції з одним технологічним переходом математична модель має вигляд .

$$P(t) = e^{-(\lambda_{\text{MPB}} + \lambda_{\text{Пр}} + \lambda_{\text{МРІ}}) \cdot t}$$

$$\lambda_{\text{MPB}} + \lambda_{\text{Пр}} + \lambda_{\text{МРІ}} = 2.516591 \times 10^{-3}$$

$$P(t) = e^{-2.516591 \times 10^{-3} \cdot t}$$

6. Розрахунок граничного (лімітуючого) значення основного (машинного) часу для регламентованих параметрів надійності виробу.

ГОСТ 13377-75 встановлює регламентовані величини гамма-відсоткового напрацювання на відмову $P(t_\gamma) = 1.00; 0.99; 0.95; 0.90; 0.80; 0.50$

Вхідна математична модель $P(t) = e^{-2.51127 \times 10^{-3} \cdot t}$

6.1. Визначення граничного значення основного часу для $P(t_\gamma) = 1.00$.

$$e^{-2.516591 \times 10^{-3} \cdot t} = 1 \text{ solve, } t \rightarrow 0 \text{ хв.}$$

6.2. Визначення граничного значення основного часу для $P(t_\gamma) = 0.99$.

$$e^{-2.516591 \times 10^{-3} \cdot t} = 0.99 \text{ solve, } t \rightarrow 3.9936310085752675677 \text{ хв.}$$

6.3. Визначення граничного значення основного часу для $P(t_\gamma) = 0.95$.

$$e^{-2.516591 \times 10^{-3} \cdot t} = 0.95 \text{ solve, } t \rightarrow 20.382054289930518478 \text{ хв.}$$

6.4. Визначення граничного значення основного часу для $P(t_\gamma) = 0.9$.

$$e^{-2.516591 \times 10^{-3} \cdot t} = 0.9 \text{ solve, } t \rightarrow 41.866364322937776233 \text{ хв.}$$

6.5. Визначення граничного значення основного часу для $P(t_\gamma) = 0.8$.

$$e^{-2.516591 \times 10^{-3} \cdot t} = 0.8 \text{ solve, } t \rightarrow 88.668977721930085487 \text{ хв.}$$

6.6. Визначення граничного значення основного часу для $P(t_\gamma) = 0.5$.

$$e^{-2.516591 \times 10^{-3} \cdot t} = 0.5 \text{ solve, } t \rightarrow 275.43100192281753746 \text{ хв.}$$

7. Значення граничних (лімітуючих) значень основного (машинного) часу для регламентованих параметрів надійності виробу.

$$t_0(P(t_\gamma) = 1.00) = 0$$

$$t_0(P(t_\gamma) = 0.90) = 41.87 \text{ хв.}$$

$$t_0(P(t_\gamma) = 0.99) = 3.99 \text{ хв.}$$

$$t_0(P(t_\gamma) = 0.99) = 88.67 \text{ хв.}$$

$$t_0(P(t_\gamma) = 0.95) = 20.38 \text{ хв.}$$

$$t_0(P(t_\gamma) = 0.95) = 275.43 \text{ хв.}$$

Значення основного машинного часу по переходах для визначеної технологічної операції порівнюють із граничними значеннями основного часу для регламентованого гамма-відсоткового напрацювання на відмову; при необхідності коректують режими різання для конкретного методу оброблення поверхні.