

МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.9.015:621.9.019

DOI: 10.31471/1993-9965-2022-2(53)-7-16

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСПАДКОВУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ВИРОБІВ ЗА КРИТЕРІЄМ ОДНОРІДНОСТІ МАТЕРІАЛУ

¹Я. М. Кусий*, ¹А. М. Кук, ²В. Г. Панчук, ¹Н. В. Фариник, ¹А. В. Зінко¹Національний університет «Львівська політехніка»;
79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12; e-mail: jarkum@ukr.net²ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: v_panch@ukr.net

У даний час розробленню фінішних технологічних операцій під час проектування ефективних технологій механічного оброблення деталей виробів на стадії їхнього створення у життєвих циклах присвячена значна кількість досліджень і публікацій. Поряд з тим, особливості формування спадкових властивостей матеріалу деталей із використанням раціональних критеріїв оцінки ступеня деградації матеріалу як на стадії створення, так і подальшій експлуатації об'єкта машинобудівного виробництва досліджені недостатньо. Під час проектних конструкторсько-технологічних робіт ступінь впливу усіх технологічних параметрів складно передбачити та врахувати відповідно до принципів технологічного успадкування властивостей деталей машин. Внаслідок прояву конструктивних і виникнення структурних концентраторів напружень під час виготовлення машинобудівних деталей зароджуються та формуються технологічні дефекти. Технологічні дефекти перетворюються у пошкодження поверхневих шарів виробів під час несприятливих експлуатаційних умов, що призводить до їхнього подальшого руйнування та відмову машин із катастрофічними наслідками для навколишнього середовища. У статті відзначено складнощі стосовно забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності деталей машин під час реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів. Запропоновано використовувати гомогенність матеріалу як параметр для аналізу технологічного успадкування характеристик поверхонь виробів після їхнього механічного оброблення, який інтегрально визначає стан матеріалу за величиною встановленої твердості. Представлено критерій однорідності матеріалу у вигляді сукупності показників для аналізу технологічного успадкування параметрів якості деталей під час їхнього виготовлення методами різання чи пластичного деформування та контролю. Запропоновану методику апробовано в процесі виготовлення валу приводного барабана стрічкового конвеєра типу TS 1850. Встановлено закономірності формування параметрів якості виробів і оцінювання ступеня деградації їхнього матеріалу під час механічної обробки функціональних поверхонь об'єктів машинобудівного виробництва.

Ключові слова: Industry4.0, функціонально-орієнтовані технології, технологічна пошкоджуваність, однорідність матеріалу, коефіцієнт гомогенності Вейбулла.

Currently, numerous studies and publications deal with the development of technological finishing processes in the design of effective technologies for processing product parts at the stage of their formation in the life cycle. At the same time, the peculiarities of the formation of inheritance properties of the material of parts using rational criteria for evaluating the degree of material degradation, both at the stage of formation and in the further operation of a technological production facility, have not been sufficiently studied. In design and technological work, it is difficult to predict the degree of influence of all technological parameters and take into account in accordance with the principles of technological inheritance of the properties of machine parts. As a result of the manifestation of structural and structural stress concentrators in the manufacture of machine parts, technological defects arise and

form. Technological defects under unfavorable operating conditions become damage to the surface layers of products, which leads to their further destruction and failure of the machine with disastrous consequences for the environment. The article refers to the difficulties in ensuring the performance and reliability of machine parts when implementing the principle of function-oriented design of technological processes. It is proposed to use material homogeneity as a parameter for the analysis of technological inheritance of surface properties of products after their processing, which integrally determines the state of the material by the value of the established hardness. The criterion of material homogeneity is presented as a set of indicators for the analysis of technological inheritance of quality parameters of parts during their manufacture by cutting or plastic deformation and control. The proposed methodology was tested during the manufacture of a shaft for the drive drum of a conveyor belt TS 1850. The regularities of formation of quality parameters of products and evaluation of the degree of degradation of their material during machining of functional surfaces of engineering objects were established.

Keywords: Industry 4.0, function-oriented technologies, technological damage, material homogeneity, Weibull homogeneity coefficient.

Постановка проблеми

Технічні умови на виготовлення деталей машин зазвичай не регламентують в повному обсязі, необхідному для забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності множини основних параметрів інженерії поверхні, а обмежуються параметрами шорсткості функціональних поверхонь та їхньої мікротвердості [1, 2]. Крім того, не завжди враховуються раціональна структура операцій, режими оброблення матеріалів у технологічних процесах виготовлення деталей, які вибирають за умови забезпечення високої продуктивності та завантаження металорізальних верстатів згідно з принципом об'єктно-орієнтованого проектування [1, 3]. Внаслідок цього під час реалізації різних технологічних процесів виготовлення об'єктів машинобудівного виробництва отримують деталі та вироби із різними експлуатаційними характеристиками та ступенем надійності [4, 5].

Технологічне успадкування властивостей деталей виробів під час реалізації принципу функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів їхнього виготовлення і вимог Industry4.0 [6, 7] враховуються у їхніх життєвих циклах завдяки аналізу всього виробничого процесу виготовлення деталей, починаючи із виробництва заготовок та закінчуючи випробуваннями перед запуском деталей і машин в експлуатацію [8, 9]. Аналіз змін однорідності матеріалу деталей машин, які отримуються різними методами на етапі заготівельного виробництва та експлуатації виробів [1, 10], доцільно реалізувати для поверхонь габаритних і важко навантажених виробів під час їхнього виготовлення. Це дає змогу перевірити правильність побудови технологічних маршрутів оброблення поверхонь деталей відповідно до технічних вимог [1, 11]. Тому метою даного дослідження є обґрунтування доцільності вибору однорідності матеріалу як параметра для аналі-

зу технологічного успадкування характеристик поверхонь механічно оброблених виробів у технологічних ланцюгах «відправка заготовка – кінцевий виріб» як визначального елемента комплексних ланцюгів «відправка заготовка – кінцевий виріб – його експлуатація – утилізація виробу».

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У практиці технології машинобудування однорідність (гомогенність) матеріалу описується коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m), за зміною якого аналізують стан поверхні деталі під час її виготовлення або експлуатації для конкретного матеріалу [12, 13]. Для іншого матеріалу, з іншими фізико-механічними властивостями динаміка зміни стану поверхні буде іншою.

Тому, для конкретизації однорідності поверхневого шару машинобудівного виробу необхідно застосовувати інші характеристики, зокрема, константи матеріалу та технологічної пошкоджуваності, встановивши їх зв'язок із коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m) [1].

У дослідженнях [1, 10] запропоновано однорідність матеріалу, що визначається певними характеристиками, розглядати як параметр для аналізу технологічного успадкування характеристик поверхонь виробів після їхнього механічного оброблення [7, 11], який інтегрально характеризує стан матеріалу після опрацювання результатів вимірювань твердості.

Працездатність деталей машин визначається умовами та особливостями їхньої роботи до настання граничного стану матеріалу [1], що забезпечується експлуатаційними характеристиками та регламентованими показниками надійності об'єктів виробництва [8, 9].

Критерій міцності під час розрахунків граничного стану матеріалу деталей машин визначається нерівністю [13]:

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

де $\sigma_{екв.}$ – еквівалентне напруження для вибраного критерію міцності;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні напруження;
 a_i – константи матеріалу.

Формування граничного стану матеріалу від зародження дефектів до відмови виробу, через прогресування пошкоджень, визначається досягненням граничних значень констант матеріалу для заданих умов навантаження [1].

У загальному випадку [13, 14]:

$$F(\tau_{kl}, \sigma_1, a_i) = 0, \quad (2)$$

де τ_{kl} – дотичні напруження.

У частковому випадку вираз (2) матиме вигляд [13]:

$$\sigma_i^b + a_1 \cdot \sigma_1^c \leq a_2, \quad (3)$$

що представляє об'єднаний критерій Писаренко-Лебедева [14]:

- для структурно-однорідного матеріалу

$$\chi \cdot \sigma_i + (1 - \chi) \cdot \sigma_1 \leq \sigma_{екв.}, \quad (4)$$

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

$$\chi = \sigma_p / \sigma_c, \quad (5)$$

де σ_p, σ_c – відповідно границі міцності на розтяг і стиск,

- для структурно-неоднорідного матеріалу

$$\chi \cdot \sigma_i \cdot Q + (1 - \chi) \cdot \sigma_1 \cdot P \leq \sigma_{екв.}, \quad (6)$$

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

Встановлено [13, 14], 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 [14]:

$$P = A_m^{1-I(\sigma)}, \quad (7)$$

де A_m – константа матеріалу, що залежить від характеру наявних дефектів;

$I(\sigma)$ – функція напружень, що визначає «жорсткість» навантаження

$$I(\sigma) = \frac{3 \cdot \sigma_0}{\sigma_i} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}. \quad (8)$$

Константа матеріалу A_m відображає статистичну сутність процесу пошкодження та руйнування матеріалу [11]:

$$A_m = \left(\frac{1-q}{q} \right)^\beta, \quad (9)$$

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

$$q = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{n} q_i, \quad (10)$$

Константа A_m визначається на підставі результатів випробувань матеріалу на міцність під час розтягу, стиску та кручення [13, 14]:

$$A_m = \frac{\sigma_{екв.} - \sqrt{3} \cdot \chi \cdot \tau_k}{(1 - \chi) \cdot \tau_k}, \quad (11)$$

де τ_k – границя міцності матеріалу при крученні.

Виходячи з умови еквівалентності ймовірностей крихкого руйнування згідно теорії Вейбулла для згину та кручення, встановлено залежність для використання неруйнівних методів контролю стану матеріалу [1, 14]:

$$A_m = \left(\frac{m+2}{4m+4} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (12)$$

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 [13, 14].

Оскільки матеріал виробу та параметри його певної поверхні слугують носіями інформації про технологічне успадкування під час виготовлення виробу, то доцільно використати параметр його однорідності для аналізу технологічного успадкування характеристик якості виробу за оцінкою деградації його властивостей.

Викладення основного матеріалу дослідження

На різних стадіях життєвих циклів деталей машин ступінь деградації матеріалу визначається таким структурно-чутливим параметром, як коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) [1, 6]. Значення m , встановлені 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 можуть бути в межах $0 \leq m \leq 1$ [10, 13].

Відповідно до теорії Качанова [15, 16], через деформації повзучості, ослаблення матеріалу чи його пошкодження, фактична («дійсна») площа сприйняття навантаження стає меншою від номінальної. Внаслідок цього, ефективне («дійсне») напруження σ стає більшим від на-

пруження в ослабленому перерізі» (netstress) σ_s .

Стан пошкодження Л.М. Качановим описано скалярною змінною – суцільністю ψ ($0 \leq \psi \leq 1$), де $\psi = 1$ означає початковий непошкоджений стан, $\psi=0$ кінцево повністю пошкоджений стан [15, 16].

Суцільність ψ характеризується ступенем поширення дефектів у визначеному об'ємі навантаженого тіла [15]:

$$\psi = \frac{\sigma}{\sigma_s}. \quad (13)$$

Відповідно до положень теорії Качанова-Работнова, залежність (13) представлено у вигляді [16]:

$$\psi = \frac{d\tilde{A}}{dA}, \quad (14)$$

$$D = 1 - \psi = \frac{dA - d\tilde{A}}{dA} = \frac{dA_D}{dA}. \quad (15)$$

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

Відповідно до формули (15) в процесі реалізації методу ЛМ-твердості зміну технологічної пошкоджуваності D визначають за розсіюванням характеристик твердості за Брінелем, Роквелом, Віккерсом за зміною коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) [1, 6]:

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

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 [1]:

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

Технологічна пошкоджуваність D (16) 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 (17) – це відношення різниці коефіцієнтів гомогенності Вейбулла основного матеріалу та в i -тому перерізі виробу до коефіцієнта гомогенності Вейбулла в i -тому перерізі виробу [1].

Для принципу функціонально-орієнтованого проектування технологічних процесів механічного оброблення деталей машин запропоновано поряд із множиною регламентованих

параметрів якості виробу (точністю оброблення, геометричними і фізико-механічними параметрами якості поверхневого шару тощо) під час аналізу технологічного успадкування враховувати динаміку зміни показників однорідності матеріалу [1]:

$$\left. \begin{aligned} m_{x_0} < m_{x_1} < \dots < m_{x_k} < \dots < m_{x_n} \rightarrow \infty; \\ v_{x_0} > v_{x_1} > \dots > v_{x_k} > \dots > v_{x_n} \rightarrow 0 \\ A_{x_0} < A_{x_1} < \dots < A_{x_k} < \dots < A_{x_n} \rightarrow 1; \\ D_{x_0} > D_{x_1} > \dots > D_{x_k} > \dots > D_{x_n} \rightarrow 0; \\ j_{D_{x_0}} > j_{D_{x_1}} > \dots > j_{D_{x_k}} > \dots > j_{D_{x_n}} \rightarrow 0. \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

де $m_{x_0} \dots m_{x_n}$; $v_{x_0} \dots v_{x_n}$; $A_{x_0} \dots A_{x_n}$; $D_{x_0} \dots D_{x_n}$, $j_{D_{x_0}} \dots j_{D_{x_n}}$ – 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 константи матеріалу A_m , технологічна пошкоджуваність матеріалу виробу D і інтенсивність зростання технологічної пошкоджуваності j_D під час оброблення функціональної (виконавчої) поверхні згідно раціонального маршруту її оброблення визначаються за результатами оброблення дослідних зразків (зразків-свідків) або вибираються із бази даних [1].

Дослідження процесу технологічного успадкування 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 операціями ТП під час виготовлення виробів [1, 13].

Під впливом технологічних факторів в процесі виготовлення виробів параметри їхнього матеріалу змінюється, причому під час використання методу ЛМ-твердості [1, 13] процес зміни контролюють не за абсолютним значенням зміни механічних характеристик матеріалу, а за їх розсіюванням [12, 13].

Встановлено, що за відомих значень розсіювання характеристик твердості матеріалу розрахункове уточнення ε_p в процесі встановлення раціонального маршруту оброблення поверхні деталі розраховують за формулою [1]

$$\varepsilon_p = \frac{m_{dem.}}{m_{zag.}}, \quad (19)$$



Рисунок 1 – Структура критерію однорідності матеріалу для аналізу технологічного успадкування параметрів якості виробів

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

Уточнення для i -того технологічного переходу за відомих значень розсіювання характеристик твердості матеріалу представлено математичною залежністю [1,11]:

$$\varepsilon_{yi} = \frac{m_i}{m_{i-1}}, \quad (20)$$

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), коефіцієнтом варіації v , константою матеріалу A_m , технологічною пошкоджуваністю D , швидкістю її зростання j_D та уточненнями по технологічних переходах механічного оброблення деталей машин ε_i (рис. 1) [1, 11].

У загальному випадку критерій однорідності матеріалу (КОМ) для аналізу технологічного успадкування параметрів якості деталей в процесі їхнього виготовлення методами різання, поверхневого пластичного деформування та контролю властивостей поверхневого шару методом LM-твердості, який визначається сукупністю показників для кожного технологічного переходу, представлено у вигляді [1]:

– для технологічного переходу в процесі технологічного успадкування властивостей КОМ $\in [m = f(H_1, H_2, \dots); v = f(H_1, H_2, \dots); A = f(m); D = f(m); j_D = f(m); \varepsilon_i = m_i/m_{i-1}]$ (21)

– для технологічного успадкування параметрів якості виробу від заготовки до деталі

$$\left. \begin{aligned} m_{x_1} < \dots < m_{x_k} < \dots < m_{x_n} &\rightarrow \infty; \\ v_{x_1} > \dots > v_{x_k} > \dots > v_{x_n} &\rightarrow 0 \\ A_{x_1} < \dots < A_{x_k} < \dots < A_{x_n} &\rightarrow 1; \\ D_{x_1} > \dots > D_{x_k} > \dots > D_{x_n} &\rightarrow 0; \\ j_{D_{x_0}} > j_{D_{x_1}} > \dots > j_{D_{x_k}} > \dots > j_{D_{x_n}} &\rightarrow 0 \\ \varepsilon_{x_1} > \dots > \varepsilon_{x_k} > \dots > \varepsilon_{x_n} &\rightarrow 0; \prod_{i=1}^n \varepsilon_i \geq \varepsilon_p \end{aligned} \right\}$$

за $T_0 = \sum_{k=1}^n t_{ok}$, (22)

– для структурно-неоднорідного стану матеріалу поверхневого шару виробу

$$m < 10; v \rightarrow 1; A_m < 0,878; D \rightarrow 1; j_D \rightarrow \infty; \varepsilon \rightarrow \infty; \quad (23)$$

– для структурно-однорідного стану матеріалу поверхневого шару виробу

$$m \geq 10; v \rightarrow 0; A_m \geq 0,878; D \rightarrow 0; j_D \rightarrow 0; \varepsilon \rightarrow 0; \quad (24)$$

де t_{ok} – основний (машинний) час під час виконання k -го технологічного переходу (метода обробки);

T_0 – сумарний основний (машинний) час на оброблення визначеної поверхні виробу.

Значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) у залежностях (21)–(24) визначають за формулами [1, 9]:

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 \cdot S(\lg(H))}, \quad (30)$$

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

$$S(\lg(H)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg(H_i) - \overline{\lg(H)})^2}, \quad (31)$$

$$\overline{\lg(H)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg(H_i). \quad (32)$$



Рисунок 2 – Вал приводного барабана стрічкового конвеєра типу TS 1850

Константи матеріалу A_m визначають за математичною залежністю (12), технологічну пошкоджуваність D та інтенсивності її зростання j_D – за формулами (16) і (17) відповідно.

Кількість використовуваних показників (21)-(24) для оцінки однорідності матеріалу заготовки деталі на визначеному технологічному переході встановлюється за 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 достатньо аналізувати за показниками m, A_m , у той час як гомогенність матеріалу кінцевої деталі – за показниками m, A_m, D, ε тощо.

Результати досліджень

Апробацію запропонованої методики здійснено в процесі виготовлення вала приводного барабана стрічкового конвеєра типу TS 1850 (рис. 2) [15].

Даний вал служить базовою деталлю приводних барабанів конвеєра стрічкового типу ТС 1850. Матеріал даного виробу – сталь 40Х ДСТУ 7806:2015 (європейські аналоги 37Cr4KD, 41CrS4). Тип початкової заготовки – прокат. Маса заготовки складає 332,24 кг за габаритних розмірів $\varnothing 160\text{мм} \times 2105$ мм, коефіцієнт використання матеріалу становить 0,73 [1, 11].

Графічні залежності визначення показників критерію однорідності матеріалу (рис. 1) представлені на рис. 3-6.

Зміна параметрів КОМ у технологічному ланцюжку «відправна заготовка – кінцевий виріб» відбувається під час механічної обробки заготовки вала за принципом технологічного успадковування його якісних параметрів.

Вихідна заготовка характеризується незадовільною гомогенністю матеріалу поверхне-

вих шарів, що характеризується близькими до нуля значеннями КОВ ($m=6,12-11,46$) і відносно високими значеннями коефіцієнта варіації ν ($\nu=9,63-18,77\%$) (рис. 3). У той же час розраховане середнє значення константи $A_m = 0,85 < 0,878$ визначає стан структурно неоднорідного матеріалу заготовки (рис. 4). Заготовка сталевого вала характеризується схильністю матеріалу поверхневих шарів його функціональних поверхонь деталі до швидкої деградації, що підтверджується близькими до одиниці величинами технологічної пошкоджуваності $D = 0,967-0,983$ (рис. 5). Поряд з тим, інтенсивність зростання технологічної пошкоджуваності j_D забезпечується параметрами $j_D=29,541-56,377$ (рис. 6).

Підвищення гомогенності поверхневих шарів заготовки відбувається після зрізання дефектного поверхневого шару після чорнового (попереднього) точіння, що визначається зменшенням значень коефіцієнта варіації ν ($\nu=2,74-3,59\%$) (рис. 3). Усунення дефектного шару характеризує перехід від структурно неоднорідного стану матеріалу початкової заготовки до структурно однорідного шару заготовки деталі із одночасним покращенням величин константи матеріалу $A_m = 0,959-0,967 > 0,878$ (рис. 4). Поряд з тим, значення технологічної пошкоджуваності зменшуються від $D=0,967-0,983$ (для початкової заготовки) до $D=0,883-0,908$ (після попереднього точіння) (рис. 5).

Чистове точіння після попередньої обробки визначає подальшу позитивну динаміку зростання коефіцієнтів Вейбулла ($m=88,03-100,43$), констант матеріалу ($A_m = 0,985-0,986$) (рис. 4), а також зниження значень коефіцієнтів варіації ν ($\nu=1,13-1,28\%$) (рис. 3). Поряд з тим, знижуються абсолютні значення та дисперсія технологічної пошкоджуваності ($D=0,713-0,748$) (рис. 5) за зменшення інтенсивності її зростання від $j_D=29,541-56,377$ (для початкової заготовки) до $j_D = 2,485-2,976$ (після чистового точіння) (рис. 6).

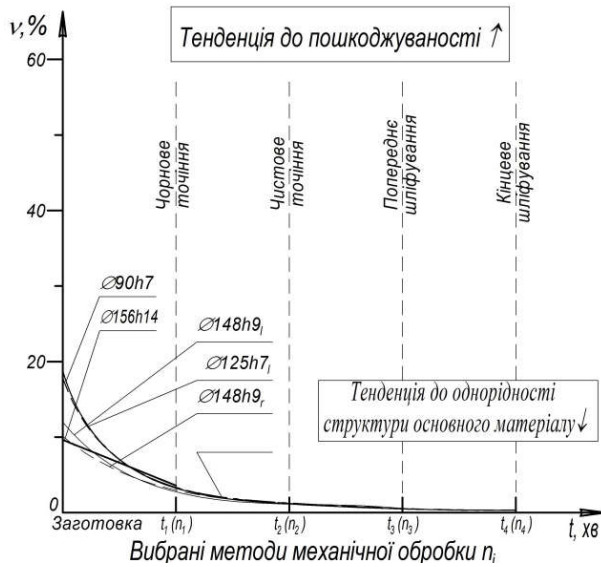


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнта варіації v у поверхневих шарах вала в процесі його механічного оброблення

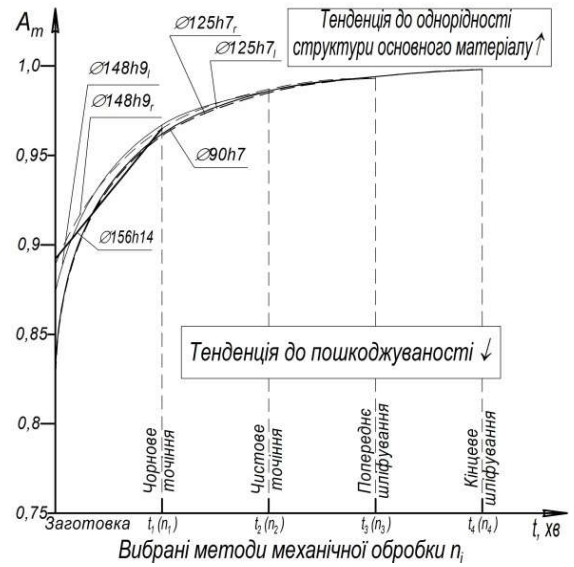


Рисунок 4 – Зміна константи матеріалу A_m у поверхневих шарах вала в процесі його механічного оброблення

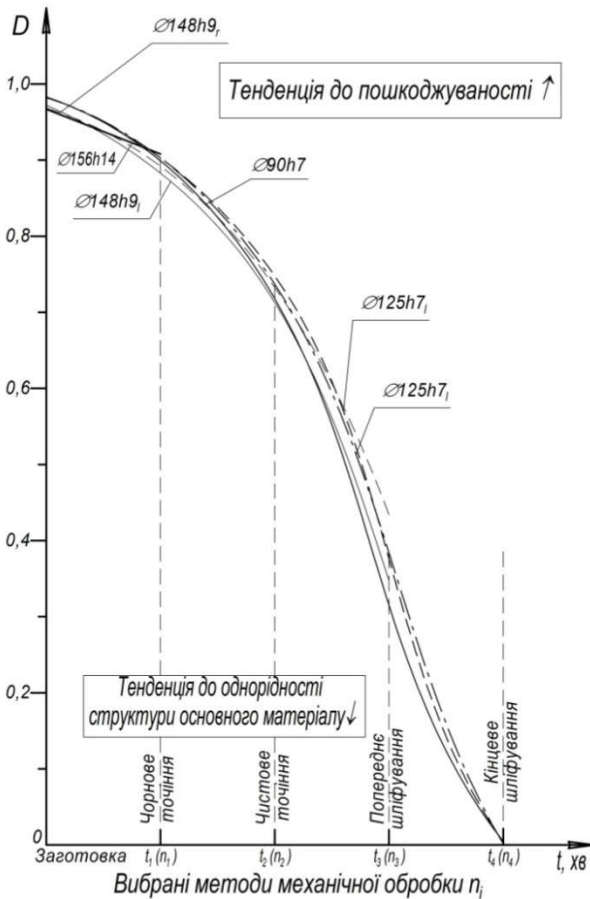


Рисунок 5 – Зміна технологічної пошкоджуваності D у поверхневих шарах вала в процесі його механічного оброблення

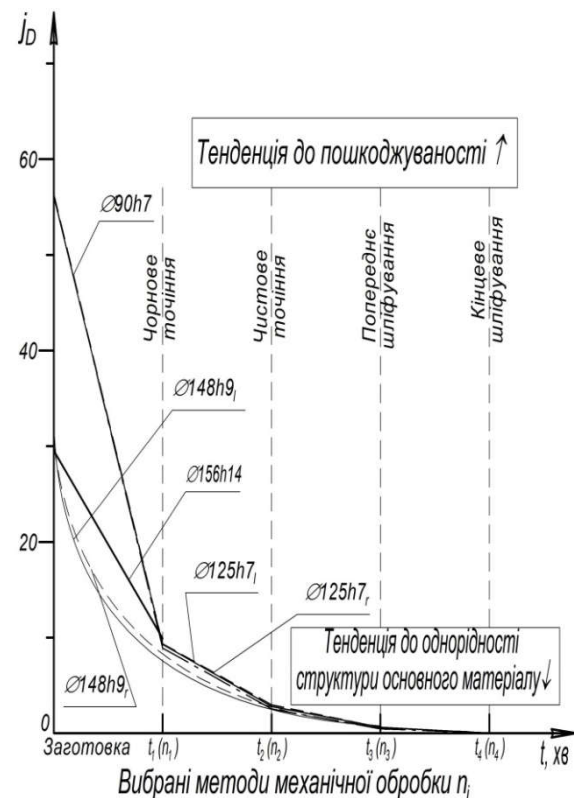


Рисунок 6 – Зміна інтенсивності зростання технологічної пошкоджуваності j_D у поверхневих шарах вала в процесі його механічного оброблення

Фінішна обробка шліфуванням функціональних поверхонь вала містить однократне (попереднє) шліфування (для діаметрів 148h₉, 148h₉_i) і двократне оброблення шліфуванням: попереднє і кінцеве (для діаметрів 90h₇, 125h₇, 125h₇_i) (рис. 2).

Подальша позитивна динаміка підвищення гомогенності функціональних поверхонь підтверджується після однократного (попереднього) шліфування лівої та правої шийок сталевого вала в розмір діаметр 148h₉, що забезпечується зростанням коефіцієнтів однорідності Вейбулла (m) ($m=198,23-206,46$), констант A_m ($A_m=0,993$) (рис. 4), зменшення коефіцієнтів варіації ν до 0,55–0,57 % (рис. 3). При цьому абсолютні значення та дисперсія технологічної пошкоджуваності D значно зменшуються ($D=0,41-0,434$) (рис. 5), що аналогічно відображається і на динаміці зміни інтенсивності її зростання $j_D=0,695-0,766$ (рис. 6).

Кінцевим (остаточним) шліфуванням лівої та правої шийок сталевого вала в розміри діаметрів 90h₇ та 125h₇ досягається найвища гомогенність оброблюваних поверхонь. Це визначається зростанням значень коефіцієнтів Вейбулла (m) ($m=333,89-344,59$), стабілізацією констант A_m ($A_m=0,996$) (рис. 4) та коефіцієнтів варіації ν ($\nu=0,33-0,34$ %) (рис. 3). Числові значення технологічної пошкоджуваності ($D=0,015-0,046$) (рис. 5) та інтенсивності її зростання $j_D=0,016-0,048$ (рис. 6) близькі до нуля, що підтверджує загальну тенденцію до гомогенності матеріалу поверхневих шарів готового вала.

Висновки

За результатами наукових досліджень зроблено основні висновки.

1. Розроблення функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей машин повинно здійснюватися системно, з поєднанням ґрунтовних теоретичних методик із експериментальними дослідженнями та аналізом технологічного успадкування властивостей матеріалу в технологічному ланцюжку «початкова заготовка – готова деталь».

2. Технологічне успадкування властивостей поверхневих шарів сталевих деталей машин під час їхнього оброблення дозволяє перетворити структурно неоднорідний матеріал заготовок у структурно однорідний матеріал кінцевих деталей. Це забезпечується підвищенням коефіцієнтів однорідності Вейбулла (m) з 6,12–11,46 (після виготовлення заготовок) до 198,23–344,59 (після різних способів шліфування) та зниженням коефіцієнтів варіації ν з 9,63–18,77 %

(після виготовлення заготовок) до 0,33–0,57 % (після різних способів шліфування).

3. Поетапне збільшення від 0,814 (після виготовлення заготовки) до 0,966 (після кінцевого шліфування) константи матеріалу деталі A_m в технологічному ланцюжку «початкова заготовка – кінцева деталь» в процесі оброблення сталевого вала та зміна розсіювання значень константи матеріалу A_m після виготовлення заготовок і попередніх технологічних методів обробки зі стабілізацією цих параметрів для фінішних/кінцевих технологічних обробок вказують на вищу однорідність структури матеріалу після фінішних обробок, на відміну від чорнових способів обробки поверхонь, та визначає практичні рекомендації щодо проектування оптимальних технологічних маршрутів оброблення функціональних поверхонь деталей машин.

4. Зниження технологічної пошкоджуваності D з 0,967–0,983 (після виготовлення заготовок) до 0,015–0,434 (після різного шліфування) забезпечує перетворення структурно неоднорідного матеріалу сталевих заготовок в структурно однорідний матеріал кінцевих деталей.

5. Розроблена методика може бути використана для оцінки та аналізу динаміки зміни однорідності матеріалу габаритних і важко навантажених деталей під час їхньої механічної обробки, контролю, натурних випробувань, подальшої експлуатації, технічного обслуговування та ремонту.

Література

1. Кусий Я.М. Науково-прикладні основи технологічного успадкування параметрів якості для забезпечення експлуатаційних характеристик виробів: дис. ... доктора техн. наук: 05.02.08 / Кусий Ярослав Маркіянович. Львів, 2021. 432 с.

2. Yoshimura M. System Design Optimization for Product Manufacturing. *Concurrent Engineering*. 2007, Vol. 15 (4). P. 329-343. <https://doi.org/10.1177/1063293x07083087>

3. 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*. 2020, Vol. 42 (1). P. 69-76. <https://doi.org/doi: 10.15407/mfint.42.01.0069>

4. Stupnytsky V., Hrytsay I. Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology. *Archive of mechanical engineering*. 2020, Vol. 67 (2). P. 149-167. <https://doi.org/10.24425/ame.2020.131688>

5. Stupnytskyy V., Hrytsay I. Computer-aided conception for planning and researching of the functional-oriented manufacturing process. *In: Metal Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.* 2020. P. 309–320. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_32

6. Kusyi Ya.M., Kuk A.M. Investigation of the technological damageability of casting at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020, Vol. 1426. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012034>

7. Kusyi Ya., Stupnytskyy V. Optimization of the Technological Process Based on Analysis of Technological Damageability of Casting. *In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.* 2020. P. 276-284. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_27

8. Stupnytskyy V. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).* 2013, Vol 2 (9). P. 1181-1186.

9. la Monaca A., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte A., Hardy M.C., Clare A.T. Surface integrity in metal machining - Part II: Functional performance *International Journal of Machine Tools and Manufacturing.* 2021, Vol. 164. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718>

10. Kusyi Ya.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.* 2021, Vol. 1781(1). 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012027>

11. Kusyi Y., Onysko O., Kuk A., Solohub B., Kopei V. Development of the Technique for Designing Rational Routes of the Functional Surfaces Processing of Products. *Lecture Notes in Networks and Systems.* 2022, Vol. 472. P. 135-143. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05230-9_16

12. Muzyka N.R., Shvets V.P., Boiko A. V. Procedure and Instruments for the Material Damage Assessment by the LM-Hardness Method on the In-Service Scratching of Structure Element Surfaces. *Strength of Materials.* 2020, Vol. 52. P. 432-439. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00195-6>

13. Масло О.М. Пошкоджувальність і граничний стан металевих матеріалів в умовах пластичного деформування при різних видах механічного навантаження: дис. ... кандидата техн. наук: 01.02.04 / Масло Олександр Миколайович. К., 2021. 227 с.

14. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. К.: Наук. думка, 1976. 416 с.

15. Kachanov L.M. Introduction to continuum damage mechanics. Dordrecht/Boston: Martinus Nijhoff Publishers, 1986. 135 p.

16. Murakami S. Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture. Dordrecht /Heidelberg/London/New York: Springer, 2012. 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2666-6>

References

1. Kusyi Ya.M. Naukovo-prykladni osnovy tekhnolohichnoho uspadkuvannia parametriv yakosti dlia zabezpechennia ekspluatatsiiny khkarakterystyk vyrobiv: dys. ... doktoratekhn. nauk: 05.02.08 / Kusyi Yaroslav Markiiianovych. Lviv, 2021. 432 s. [in Ukrainian]

2. Yoshimura M. System Design Optimization for Product Manufacturing. *Concurrent Engineering.* 2007, Vol. 15 (4). P. 329-343. <https://doi.org/10.1177/1063293x07083087>

3. 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.* 2020, Vol. 42 (1). P. 69-76. <https://doi.org/doi:10.15407/mfint.42.01.0069>

4. Stupnytskyy V., Hrytsay I. Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology. *Archive of mechanical engineering.* 2020, Vol. 67 (2). P. 149-167. <https://doi.org/10.24425/ame.2020.131688>

5. Stupnytskyy V., Hrytsay I. Computer-aided conception for planning and researching of the functional-oriented manufacturing process. *In: Metal Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.* 2020. P. 309–320. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_32

6. Kusyi Ya.M., Kuk A.M. Investigation of the technological damageability of casting at the stage of design and technological preparation of the machine Life Cycle. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020, Vol. 1426. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012034>

7. Kusyi Ya., Stupnytskyy V. Optimization of the Technological Process Based on Analysis of Technological Damageability of Casting. *In:*

Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2020. P. 276-284. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_27

8. Stupnytskyy V. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013, Vol 2 (9). P. 1181-1186.

9. la Monaca A., Murray J.W., Liao Z., Speidel A., Robles-Linares J.A., Axinte .A., Hardy M.C., Clare A.T. Surface integrity in metal machining - Part II: Functional performance *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021, Vol. 164. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103718>

10. Kusiya Ya.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*. 2021, Vol. 1781(1). 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012027>

11. Kusiya Y., Onysko O., Kuk A., Solohub B., Kopei V. Development of the Technique for Designing Rational Routes of the Functional Surfaces Processing of Products. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022, Vol. 472. P. 135-143. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05230-9_16

12. Muzyka N.R., Shvets V.P., Boiko A. V. Procedure and Instruments for the Material Damage Assessment by the LM-Hardness Method on the In-Service Scratching of Structure Element Surfaces. *Strength of Materials*. 2020, Vol. 52. P. 432-439. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00195-6>

13. Maslo O.M. Poshkodzhuvanist i hranychnyi stan metalevykh materialiv v umovakh plastychnoho deformuvannia pry riznykh vydakh mekhanichnoho navantazhennia: dys. ... kandydata tekhn. nauk: 01.02.04 / Maslo Oleksandr Mykolaiovych. K., 2021. 227 p. [in Ukrainian]

14. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Deformirovanie i prochnost materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii. K.: Nauk. dumka, 1976. 416 p. [in Russian]

15. Kachanov L.M. Introduction to continuum damage mechanics. Dordrecht/Boston: Martinus Nijhoff Publishers, 1986. 135 p.

16. Murakami S. Continuum Damage Mechanics – A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture. Dordrecht /Heidelberg/London/New York: Springer, 2012. 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2666-6>

Подяка

Робота виконана в рамках проекту «Комплексна система функціонально-орієнтованого проектування обробки важкооброблюваних матеріалів для військово-промислового комплексу» (2022-2023), що фінансується Науковою радою Литви та Міністерством освіти і науки України в рамках Литовсько-української програми співпраці в галузі досліджень і технологій (договір № М/15-2022 від 19.05.2022).