

Представлено аналіз взаємозв'язків технологічної спадковості із етапами життєвого циклу деталей і особливостями будови їх поверхневого шару. Досліджено вплив технологічного маршруту оброблення литих заготовок на формування пошкоджень. На основі моделі функціонально-градієнтної будови границь зерна показана роль режимів різання в утворенні структурних концентраторів напружень. Намічено шляхи подальших досліджень

Ключові слова: технологічний процес, надійність, лита заготовка, технологічне пошкодження, концентратор напружень

Представлен анализ взаимосвязей технологической наследственности с этапами жизненного цикла деталей и особенностями строения их поверхностного слоя. Исследовано влияние технологического маршрута обработки литых заготовок на формирование повреждений. На основе модели функционально-градиентного строения границ зерна показана роль режимов резания в образовании структурных концентраторов напряжений. Намечены пути дальнейших исследований

Ключевые слова: технологический процесс, надежность, литая заготовка, технологическое повреждение, концентратор напряжений

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО МАРШРУТУ ОБРОБЛЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ МІЖЗЕРЕННІ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ВИЛИВКІВ

Я. М. Кусий

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра технології машинобудування*

E-mail: jarkym@ukr.net

О. А. Кузін

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів*

E-mail: n_kuzin@mail.ru

М. О. Кузін

Кандидат технічних наук, доцент
Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна
вул. Ів. Блажкевич, 12а, м. Львів, Україна, 79052

Провідний науковий співробітник
Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України
вул. Липинського, 54, м. Львів, Україна, 79029
*Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

При реалізації сучасних технологій механічного оброблення деталей та складання машин намагаються забезпечити високий рівень технічних вимог до виробів при мінімально можливій собівартості [1]. Однак конкурентоздатність виробів визначається не лише якісно-економічними показниками, а й характеристиками надійності, які проявляються під час експлуатації виробів [1–3]. Варто відзначити, що силові, теплові, хімічні та інші впливи на заготовку та матеріали, котрі супроводжують технології механооброблення та складання, в деяких випадках призводять до виникнення у виробах невідповідностей продукції вимогам нормативно-технічної документації [4].

Економічна доцільність комплексного забезпечення якості деталей на всіх стадіях їх життєвого циклу зумовила необхідність аналітичного підходу і до їх робочих поверхонь, що сформувало новий напрямок досліджень – інженерію поверхні [5]. При забезпеченні показників якості важливу роль відіграє спадковість

(рис. 1) – перенесення властивостей оброблюваного об'єкту (заготовки) від попередніх етапів проектування до наступних, що відображається на експлуатаційних характеристиках кінцевого виробу [6].



Рис. 1. Різновиди спадковостей у життєвих циклах машини та інженерії поверхні [6]

В зв'язку з тим, що при зовнішніх навантаженнях на поверхні виникають потоки дефектів, які сприяють розвитку пошкоджень, важливе значення поверхневих шарів у формуванні параметрів надійності виробів

має стан поверхневих шарів. Найефективнішими методами керування такими потоками є створення в деталях функціонально-градієнтних структур шляхом поверхнево-пластичного деформування (ППД), хіміко-термічної, лазерної та плазмової обробки. При цьому підвищення довговічності досягається за рахунок зміни напружено-деформованого стану в локальних зонах деталей, що дозволяє ефективно керувати поверхневими дефектами, розвитком знеміцнення та деструктивних процесів, матеріалу, але вимагає детального аналізу ролі структурних параметрів в процесах руйнування [6].

Відповідно до цих підходів вивчення поверхневих шарів необхідно здійснювати комплексно на всіх етапах життєвого циклу деталей [3, 5, 6].

Вирішення проблеми надійності машин вимагає нових підходів, що на сучасному етапі розвитку машинобудування реалізується впровадженням PLM – концепції (Product Lifecycle Managment), які представляють собою систему керування життєвим циклом виробів із використанням (машини) із проектуванням функціонально-орієнтованих технологій виробництва засобами паралельного інжинірингу. Складність умов експлуатації виробів і технологічних процесів обробки, при яких проявляються різновиди спадковості, серед яких ґрунтовні дослідження на формування показників якості проведені лише для технологічної [7, 8], вимагає подальшого глибокого теоретичного та експериментального вивчення фізичного змісту даних явищ.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Безпосередньо встановити зв'язок між відправними, поточними і вихідними параметрами технологічного процесу та показниками надійності досить складно (рис. 2). Показники надійності пов'язані не тільки з відправними параметрами технологічного процесу, а також з експлуатаційними властивостями виробів – зносостійкістю, втомною міцністю, корозійною стійкістю, теплостійкістю тощо.

Залежність експлуатаційних властивостей виробів від показників їх якості є складною за наступних причин [4, 9]:

1) процес втрати працездатності, маючи певну фізичну природу, підпорядковується закономірностям випадкових функцій через змінність умов експлуатації і нестабільність технологічного процесу;

2) через складності більшості технологічних процесів і виникаючих побічних явищ важко виявити всі ті параметри процесів, які дійсно впливають на експлуатаційні властивості виробів.

Розкриття залежностей між якістю виробу і його експлуатаційними властивостями базується на вивченні фізичних процесів руйнування матеріалів, причому експлуатаційні властивості виробу пов'язані з показниками надійності складними емпіричними залежностями.

Таким чином, технологічний процес має безпосередній і істотний вплив на показники надійності, хоча ці зв'язки складні, багатостадійні і не є очевидними [1, 4, 6, 9–11].

В сучасній літературі при аналізі впливу технологічної спадковості на параметри якості кінцевого виробу недостатньо враховується роль заготівельних операцій [4, 12]. Структуру та властивості заготовок слід розглядати в тісному поєднанні із спадковістю металу з рідкого стану, оскільки лише 25 % властивостей шихти передається заготовці, а 75 % формується під час заливання та затверднення при охолодженні [10]. Технологічні чинники, що виникають в металургійному процесі при виконанні ковальсько-штампувальних і термічних операцій, проходять надалі увесь технологічний ланцюжок отримання виробів і мають значний вплив на формування кінцевих характеристик оброблених поверхонь [7, 13].

Внаслідок структурної спадковості фізична та хімічна неоднорідності, що формуються під час твердіння заготовки, у певних випадках трансформуються у пошкодження при технологічних обробках [12–14]. Механізм перетворення дефектів у технологічні пошкодження є до кінця не вивченим і вимагає ґрунтовних досліджень.

В роботі [6] встановлено формулу для оцінки ймовірності безвідмовного здійснення технологічного процесу $P(t)$, що безпосередньо залежить від ймовірностей виконання технологічного процесу на заготівельній операції $P_0(t)$, на проміжних і-тих операціях $P_{X_i}(t)$ і ймовірності P_k відбракування виробів P_k :

$$P(t) = \prod_{i=1}^m \left[1 - (1 - P_0)(1 - P_{X_i}) \cdot (1 - P_k) \right]. \quad (1)$$

При впровадженні методу контролю технологічного процесу та розробленні методу контролю показників надійності виробів формула (1) матиме вигляд [6]:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m \left[1 - (1 - P_0)(1 - P_{X_i}) \right]. \quad (2)$$

Для використання формули (2) необхідно розробити методику визначення $P_0(t)$, $P_{X_i}(t)$ і пов'язати параметри технологічного процесу із показниками надійності.

3. Мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження – пошкодження поверхонь вилитих заготовок після різних технологічних маршрутів їх оброблення.

Мета дослідження полягає в аналізі впливу заготівельних операцій технологічних процесів виготовлення виробів на забезпечення показників якості, експлуатаційних характеристик, надійності деталей машин і формування раціональних технологічних маршрутів оброблення поверхонь.

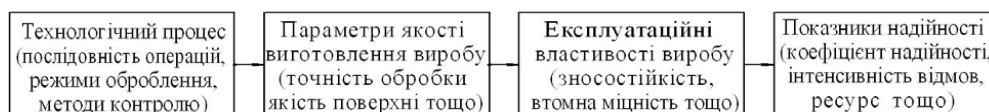


Рис. 2. Схема залежності показників надійності від рівня технологічного процесу [1]

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- провести аналіз сучасних концепцій оцінювання пошкоджуваності;
- спланувати та реалізувати експериментальні дослідження впливу раціонального вибору технологічного маршруту оброблення поверхонь на формування технологічних пошкоджень;
- на підставі експериментальних досліджень впливу технологічного маршруту оброблення поверхонь на формування технологічних пошкоджень розробити рекомендації стосовно вибору раціонального маршруту та режимів оброблення для зменшення пошкодженості деталей машин.

4. Формування технологічних пошкоджень при обробках заготовок

4.1. Сучасні концепції оцінювання пошкоджуваності матеріалів і виробів

Дослідженнями [4, 5, 9–11] встановлено, що в багатьох випадках відмови виробу пов'язані із технологією його виготовлення, причому частина відмов належить до недопустимих, коли їх характер і швидкість не відповідають встановленим вимогам (рис. 3).

Перша група причин пов'язана з необґрунтованістю технічних умов на параметри виробу, що повинні відображати основні вимоги надійності (рис. 4). Друга група причин формування до недопустимих відмов через технологію, викликана недостатньою надійністю самого технологічного процесу, як складної динамічної системи із великою кількістю взаємозв'язків і множиною відправних і вихідних параметрів. Третя група причин виникнення недопустимих відмов пов'язана із залишковими та побічними явищами, що породжені технологічним процесом [4, 9], є найменш вивченою.



Рис. 3. Класифікація недопустимих відмов, пов'язаних із недосконалістю технологічних процесів [4]

Заготівельні операції, зокрема механічна, хіміко-термічна обробки формують дефекти структури, які під час експлуатації конструкції починають інтенсивно розвиватися, зароджуючи небезпечніші пошкодження у вигляді пор і мікротріщин складної конфігурації.

Розвиток теорії накопичення розсіяних пошкоджень (дефектів), основні концепції якої сформовані у працях [13, 15–17], дає можливість проводити аналіз причин погіршення характеристик фізико-механічних властивостей матеріалів виробів.

Проте, відсутність фізично й експериментально обґрунтованого критерію адекватної оцінки рівня поточної пошкодженості 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.

Спроба вирішити це завдання була зроблена, наприклад, вченими Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, що спільно з фахівцями із Росії розробили та запропонували нормативний документ РД 34.17.440/96, який в 1999 році було введено в дію [18]. Дослідження реального ресурсу роторів, корпусних деталей та інших відповідальних деталей турбін дозволили авторам скоригувати запропоновані раніше підходи й запропонувати простішу, але, на їх думку, досить надійну методику визначення коефіцієнта запасу за граничним рівнем пошкоджуваності матеріалу. Отримані результати відображені в роботі [18], з якої випливає, що її автори, у зв'язку з відсутністю достовірних моделей, які описують кінетику накопичення пошкоджень і, отже, їх граничних значень, змушені були обмежитися 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.

Для аналізу та оцінки перетворення неоднорідності приповерхневих шарів зразків, отриманих в умовах лиття, в технологічні пошкодження при обробці різанням, використали метод ЛМ-твердості. Згідно цього методу за параметр пошкоджуваності прийнято ступінь розсіювання характеристик механічних властивостей матеріалу на зруйнованих зразках після напрацювання при різних рівнях напружень в зв'язку з тим, що більш представницькими щодо кореляції будь-якої механічної характеристики матеріалу та стану структури є не їх абсолютні значення, а деякі похідні цих значень, зокрема, розсіювання результатів вимірювань, виконаних однаковими приладами в ідентичних умовах. Даний метод найпростіше реалізувати, використовуючи як механічну характеристику твердість, значення якої застосовують для непрямої оцінки властивостей матеріалів [19, 20].

Параметром, що інтегрально характеризує стан матеріалу під час опрацювання результатів вимірювань твердості, є гомогенність, яка оцінюється за коефіцієнтом Вейбулла (m).

Великим значенням коефіцієнта m відповідає низький рівень розсіювання характеристик твердості, низький ступінь пошкоджуваності; меншим значенням, навпаки, вищий ступінь пошкоджуваності [19–21].

4.2. Експериментальні дослідження впливу технологічного маршруту оброблення поверхонь на формування пошкоджень і їх аналіз

Дослідження проводили на виливках призматичної форми 145×60×15 мм із сплавів типу АК (рис. 4), отриманих литтям в кокіль.



Рис. 4. Експериментальний зразок-виливок

Технологічний маршрут отримання та оброблення заготовок містив наступні варіанти:

Варіант 1

а) лиття в холодний і підігрітий кокіль;

б) чорнове фрезерування поверхонь виливків: металорізальний інструмент – кінцева фреза $\varnothing 12$ мм ($z=2$); режими оброблення – глибина різання $t=1$ мм; частота обертання шпинделя $n=700$ хв $^{-1}$; ручна подача – $S_{хв}=100-120$ мм/хв;

в) чистове фрезерування поверхонь виливків: металорізальний інструмент – кінцева фреза $\varnothing 16$ мм

($z=4$); режими оброблення – глибина різання $t=0,3^{+0,05}$ мм; частота обертання шпинделя $n=1050$ хв $^{-1}$; подача – $S_{хв}=13$ мм/хв.

Варіант 2

а) лиття в холодний і підігрітий кокіль;

б) чистове фрезерування поверхонь виливків: металорізальний інструмент – кінцева фреза $\varnothing 16$ мм ($z=4$); режими оброблення – глибина різання $t=0,25^{+0,05}$ мм; частота обертання шпинделя $n=1050$ хв $^{-1}$; подача – $S_{хв}=13$ мм/хв.

Після заготівельної операції та кожного технологічного переходу визначали твердість методом Роквелла на приладі ТР5006 (рис. 5) та розраховували коефіцієнт гомогенності за формулою [19]:

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 \cdot S(\lg(H))}, \quad (3)$$

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

$$S(\lg(H)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg(H_i) - \overline{\lg(H)})^2}, \quad (4)$$

$$\overline{\lg(H)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg(H_i). \quad (5)$$

Для кращої відтворюваності результатів проводили дві серії дослідів. Кількість вимірювань становила $n=35$, $d(n=35)=1,1284$.

Результати опрацьованих експериментальних досліджень приведено на рис. 6–9.



Рис. 5. Експериментальний зразок із замірами твердості профрезерованої площини

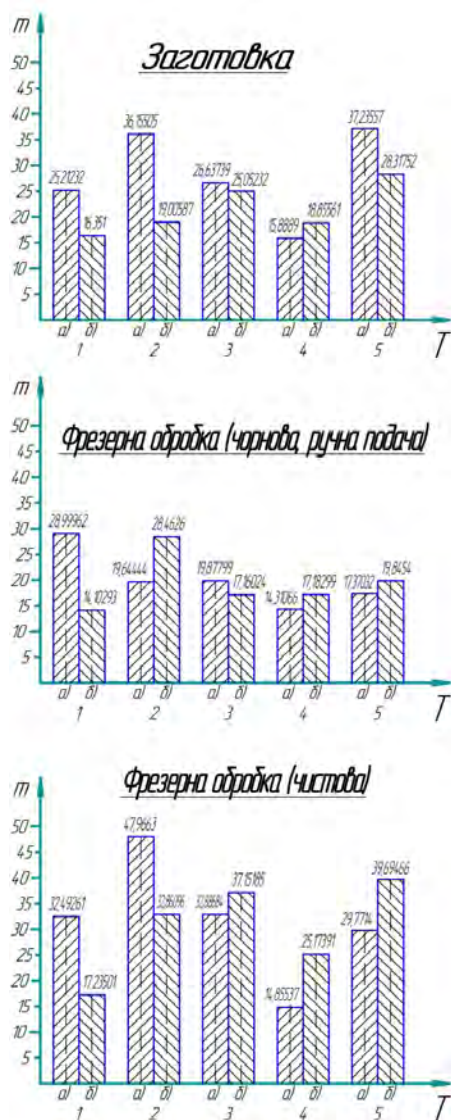


Рис. 6. Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) на поверхнях литої заготовки, а також після чорнкової та чистової фрезерних обробок: а, б – виливки, отримані з однієї плавки (1, 4 – розлиті в холодні кокілі; 2, 3, 5 – розлиті в підігріті кокілі), T – порядковий номер експериментального дослідження

Результати досліджень показали зростання значення коефіцієнта Вейбулла при формоутворенні виливків в умовах зменшення температурного поля між металом, який кристалізується, і формою (рис. 8, 9). Це пояснюється меншим рівнем розвитку неоднорідностей в умовах кристалізації.

Аналіз результатів на поверхні, отриманої після чорнового фрезерування на глибину 1 мм, показав менше значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла m , що пов'язано із зростанням пошкодженості матеріалу в деформаційній зоні обробленого шару. Проведення чистового фрезерування після чорнового на глибину 0,3 мм сприяло зростанню коефіцієнта гомогенності Вейбулла, що обумовлено зняттям шару металу з розвинутою пошкодженістю при даній обробці (рис. 6, 8).

Дослідження заготовок, посергово оброблених чистовим фрезеруванням при різанні на глибини $h_1 = 0,3$ мм; $h_2 = 0,6$ мм, засвідчили зростання на 26–84 %

значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла, що пов'язано із зменшенням пошкодженості матеріалу в зоні поля чистової фрезерної обробки (рис. 7, 9).

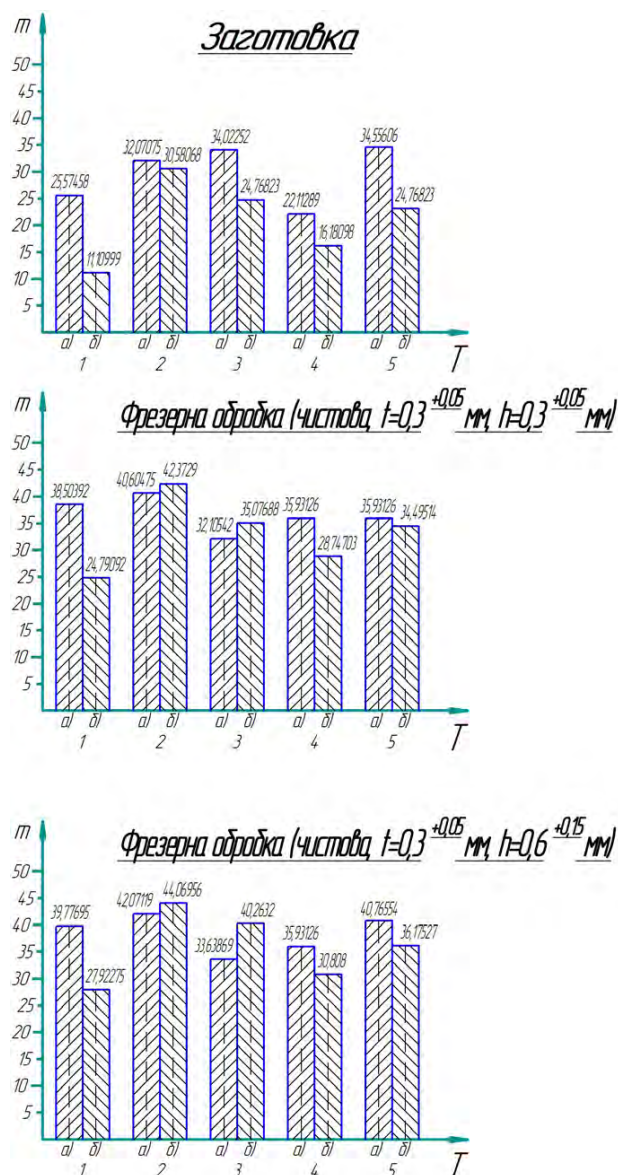


Рис. 7. Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) на поверхнях литої заготовки, а також після двох чистових фрезерних обробок: а, б – виливки, отримані з однієї плавки (1, 4 – розлиті в холодні кокілі; 2, 3, 5 – розлиті в підігріті кокілі), T – порядковий номер експериментального дослідження

Локальна природа руйнування в умовах різання обумовлює потребу в дослідженні процесу накопичення пошкоджень у матеріалах при обробці. Багатостадійний процес руйнування містить наступні етапи:

- 1) накопичення пошкоджень і порушення суцільності матеріалу в полі напружень і деформацій;
- 2) розвиток мікротріщин в середовищі з дефектами;
- 3) ріст тріщин і відокремлення матеріалу при завантаженні на границях заготовки навантаженнях і переміщеннях.

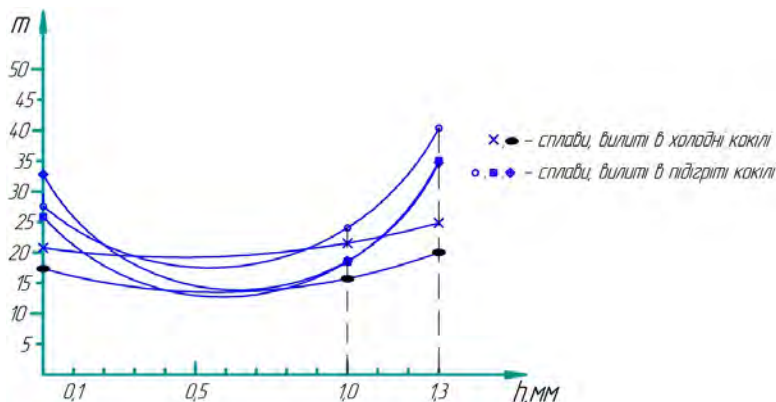


Рис. 8. Розподіл коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) по глибині поверхневого шару матеріалу (h) для першого варіанта технологічного маршруту отримання та оброблення заготовок

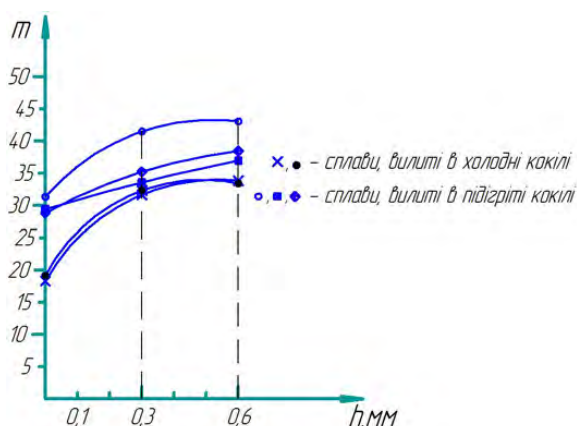


Рис. 9. Розподіл коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) по глибині поверхневого шару матеріалу (h) для другого варіанта технологічного маршруту отримання та оброблення заготовок

У більшості робіт механіки, що описують пошкодження, її утворення не пов'язується із структурою матеріалів. І тільки при використанні енергетичних підходів для опису процесів накопичення пошкоджень [22], розглядають, що в результаті в'язко-пластичної деформації розвиваються два види мікропошкоджень – по тілу і по границях зерен. Внутрішніми змінними, що визначають процеси накопичення пошкодження є скалярні параметри – енергія пошкодження по тілу зерна W_p і енергія пошкодження по границях зерен W_n :

$$W_k = \int w_k, \quad k = p, n. \quad (6)$$

Потужність W_k залежить від історії в'язко-пластичного деформування матеріалу. Пошкодження по тілу і по границях зерен характеризується відповідно відносними параметрами пошкодження W_p і W_n і відповідно:

$$0 \leq W_p \leq 1, \quad (7)$$

$$0 \leq W_n \leq 1. \quad (8)$$

Загальна пошкодженість матеріалу W :

$$0 \leq W \leq 1. \quad (9)$$

Приріст пошкодженості:

$$\Delta W = dW_n + dW_p, \quad (10)$$

де

$$dW_n = dW_n(T, W_n, W_p)$$

і

$$dW_p = dW_p(T, W_n, W_p).$$

Загальний приріст пошкодженості:

$$\Delta W = dW_n + dW_p, \quad (11)$$

$$\Delta W_n = \Delta W_{nR} + \Delta W_{n\delta}, \quad (12)$$

$$\Delta W_p = \Delta W_{pR} + \Delta W_{p\delta}, \quad (13)$$

де ΔW_{nR} , $\Delta W_{n\delta}$ – прирости зерно-граничної пошкодженості відповідно за рахунок в'язко-пластичного деформування і в результаті зміни умов деформування; ΔW_{pR} , $\Delta W_{p\delta}$ – прирости внутрішньо-зеренної пошкодженості відповідно за рахунок в'язко-пластичного деформування і в результаті зміни виду напруженого стану і температури.

При дії зовнішнього навантаження в деталях від границь зерен, що виходять на поверхню утворюються дислокації. У результаті різниці пружних характеристик між зернами полікристала на пружній стадії навантаження поблизу міжзеренних границь виникають концентрації напружень. Величина напружень є тим більшою, чим більша різниця пружних модулів контактуючих кристалів. Найбільший рівень напружень спостерігається в області потрійних стиків зерен і границь, що виходять на поверхню. Тут відбувається зародження пластичних зсувів при зростанні навантажень.

Кожне поверхнєво пластично деформоване зерно є концентратором напружень і сприяє пластичній деформації контактуючих з ними зерен. Особливо біля тих ділянок границь, де діють максимальні напруження зсуву. Інтенсивна деформація поверхневих зерен пов'язана із їх більшою свободою формозміни порівняно із зернами всередині полікристала.

Вирішальну роль у формуванні пошкоджень і процесах міжзеренного руйнування конструкційних сталей відіграють великокутові границі зерен. Вплив границь розділу різного походження на процеси деформації і руйнування сталей є невивченим. Значною мірою це пов'язано із тим, що в існуючих моделях границь зерен будова і структурно-фазовий стан приграничних зон зерен не враховується.

Структуру границі зерна і приграничного шару розглядають як функціонально-градієнтну [23]. При переході від однорідного розподілу властивостей в об'ємній частині кристалічного тіла є масовий вихід дислокацій і формується перша зона з підвищеною густиною лінійних дефектів, в якій напруження стиску

зберігають форму і властивості об'ємів середини зерна. В цій зоні закладаються неоднорідність геометричних і енергетичних властивостей, які проявляються в наступних зонах приграничного шару, залежно від стадії еволюції дислокаційної підсистеми (хаотичний розподіл дислокацій, клубки, комірки, фрагменти). Дислокаційну структуру зони можна розглядати, як результат дисипації пружної енергії, яка призводить до самоорганізації нерівноважних структур, забезпечуючи стабільність системи зерен.

Наступна зона має рихлу, пористу структуру, пов'язану з обривом дислокацій в першій зоні. З ній присутні напруження розтягу. У пористій частині приграничного шару напруження розтягу збільшують періоди ґратки, тому енергія цієї зони має більше значення порівняно з енергією об'ємної частини кристалічної ґратки.

Вакансійне перенасичення перехідного поверхневого шару приводить до формування в системі структурно-концентраційних неоднорідностей. Результатом хімічної взаємодії насиченої вакансіями кристалічної ґратки з фазами є утворення третьої зони нестехіометричного перехідного шару із наявними з'єднаннями, хімічний склад яких може змінюватись. Ця зона нестехіометрії є зоною ряду твердих розчинів або адгезійно-закріплюючим шаром, де утворюються фази нестехіометричного складу і фази, які характерні для внутрішніх об'ємів зерна. У цьому шарі для розміщення атомів є відсутнім стабільне координаційне число, яке має місце в кристалічно-впорядкованій центральній частині зерна. У результаті маємо хімічну нестабільність шару, оскільки координаційне число матеріалу може змінюватись внаслідок реакції на зовнішні умови – температуру і механічні навантаження.

При дії зовнішніх навантажень в пористій структурі відбуваються внутрішні перетворення в найбільш енергетично вигідну для сприйняття навантаження локальну структуру [22]. У зв'язку з тим, що при створенні і експлуатації матеріалів дефекти кристалічної структури виникають як результат дисипації енергії, внесеної в матеріал, границі представляють собою локальні об'єми, в яких відбувається накопичення дефектів і перебудова структури аналогічно фазовим переходам другого роду. Бар'єр енергії активації фазових переходів долається при навантаженні матеріалу в процесі експлуатації.

Одним з головних факторів, який визначає властивості границь, є їх пустотно-шорстка пориста структура. Залежно від вільного або надлишкового об'єму (пористості) і зернограничних дефектів, одна і та сама границя має різні властивості. Мірою відхилення границі розподілу від рівноваги є величина вільного об'єму, яка визначається питомою кількістю пустот на одиницю площі поверхні границі:

$$v_f = \frac{V_f}{S}, \quad (14)$$

де V_f – абсолютний об'єм міжчастинних пустот в матеріалі структурного елемента в межах граничного шару; S – площа границі структурного елемента. В якості пустот можуть бути пори, несучільності, вакансії, вакансійні кластери мікро- та наноскопічних розмірів. Існує деякий критичний вільний об'єм v_f^k , при якому

границя перетворюється в дві незв'язуючі поверхні. Залежність енергії границь зерен від величини вільного об'єму представлена на рис. 10.

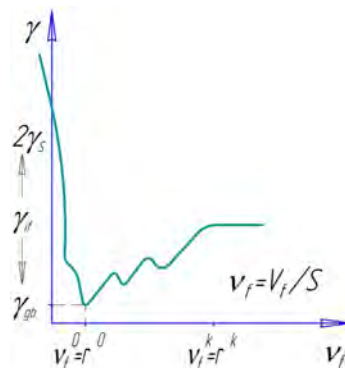


Рис. 10. Залежність енергії границь полікристалічних сплавів від величини вільного об'єму [17]: $2\gamma_s$ – енергія двох незв'язуючих поверхонь зародка руйнування; γ_{gh} – енергія рівноважних границь зерен; γ_{if} – інтервал можливих значень енергії границь

Досягнення на границях розділу структурних елементів критичного значення вільного об'єму (v_f^k) є небезпечним, оскільки в цьому випадку формуються пори і тріщини, які призводять до руйнування сплаву. При певному значенні вільного об'єму (v_f^0) енергія границі відповідає рівноважній γ_{gh} . В інтервалі вільного об'єму від v_f^0 до v_f^k може існувати не одна, а декілька можливих нерівноважних границь.

У процесі міжзеренного руйнування матеріалу утворюються нові поверхні. У випадку крихкого міжзеренного руйнування при відсутності пластичної деформації поблизу границі енергія руйнування визначається співвідношенням:

$$\gamma^* = 2\gamma_s - \gamma_b, \quad (15)$$

де γ_s – поверхнева енергія; γ_b – вільна енергія границь зерна. У зв'язку з тим, що енергія границі зерна γ_b залежить від зернограничної структури, енергія міжзеренного руйнування γ^* також залежить від структури. У випадку, коли пластична деформація супроводжує міжзеренне руйнування, його енергія γ^* є більшою, ніж при її відсутності, а вплив зернограничної структури є сильнішим. Міжзеренне руйнування сплавів відбувається внаслідок концентрації напружень, яка обумовлена розвитком зернограничного проковзування на різних нерегулярностях довільних границь – уступах, виділеннях, потрібних стиках [22]. Ступінь проковзування залежить від структури сплавів. Малокутові і спеціальні границі мають нижчі значення граничної енергії γ_b , ніж довільні границі. Тому вони є стійкішими до міжзеренного руйнування, яке по границях цих типів не відбувається. Тріщина, яка зароджується на довільній границі, рухається по граничним поверхням, вибираючи їх в кожному потрібному стику. Фактори, які зменшують когезивну міцність довільних границь, збільшують ймовірність проходження через них тріщин.

Таким чином, вплив режимів різання на технологічну пошкоджуваність в значній мірі пов'язаний з формуванням пустотно-шорстких пористих структур

границь і потрійних зеренних стиків, які виходять на оброблену поверхню. При чорнових обробках питома кількість пустот на одиницю площі поверхні границі наближається до критичного вільного об'єму V_f^k , при якому границя може перетворюватися в дві не взаємодіючі поверхні. Після чистових обробок питома кількість пустот на границях зерен є меншою і тому їх роль, як структурних концентраторів напружень під час експлуатації виробів, зменшується.

5. Висновки

В результаті проведених досліджень:

- показано, що оцінку поточної пошкодженості поверхневих шарів виробів після обробки різанням доцільно проводити за ступенем розсіювання характеристик твердості;
- на основі проведених досліджень встановлено, що внаслідок структурної спадковості фізична та хімічна неоднорідності, що формуються під час твердіння й утворення структури заготовки, у визначених випадках трансформуються у пошкодження при технологічних обробках;
- підвищення силових навантажень при чорново-му механічному обробленні, зокрема, фрезеруванні,

сприяє отриманню в заготовках градієнтної структури та зростанню пошкодженості поверхневих шарів. Зниження силових характеристик процесу різання на чистових режимах, з огляду на формування пустотно-шорстких пористих структур границь і потрійних зеренних стиків, зменшує кількість структурних концентраторів напружень, що має позитивний вплив на поведінку деталей під час експлуатації.

Подальші дослідження у цьому напрямку:

- оптимізація структури технологічних процесів із врахуванням технологічної спадковості при раціональному поєднанні заготівельних, проміжних, фінішних і викінчувально-зміцнювальних операцій;
- встановлення безпосередніх зв'язків між показниками надійності та технологічними параметрами;
- розроблення практичних рекомендацій по використанню енергоощадних технологій, зокрема вібраційних, для покращання експлуатаційних характеристик деталей машин;
- застосування методу LM-твердості для розрахунку граничного рівня пошкоджуваності матеріалу з подальшим визначенням коефіцієнтів запасу при моніторингу поточного та критичного стану конструкції за розсіяними пошкодженнями, а також прогнозування кінетики зміни цих коефіцієнтів в процесі напрацювання.

Література

1. Кусий, Я. М. Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення для технологічного забезпечення безвідмовності деталей машин / Я. М. Кусий, А. М. Кук // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – Т. 1, № 7 (73). – С. 41–51. doi: 10.15587/1729-4061.2015.36336
2. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем [Текст]: учебник / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – М.: Логос, 2001. – 208 с.
3. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст] / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
4. Проников, А. С. Надежность машин [Текст] / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
5. Инженерия поверхности деталей [Текст] / под ред. А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
6. Кузін, О. А. Вплив технологічної спадковості на параметри надійності виробів [Текст] / О. А. Кузін, Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2015. – Т. 1, № 1 (21). – С. 15–21. doi: 10.15587/2312-8372.2015.37678
7. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении [Текст] / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченко. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
8. Маркарян, Г. К. Технологическая наследственность при образовании поверхности закаленных деталей машин [Текст] / Г. К. Маркарян // *Физика резания металлов*. – 1971. – Вып. 1. – С. 32–34.
9. Афтаназів, І. С. Технологічне забезпечення надійності деталей машин: конспект лекцій для студентів спеціальності 7.090202 «Технологія машинобудування» [Текст] / І. С. Афтаназів. – Львів: ДУЛП, 1998. – 132 с.
10. Божидарнік, В. В. Технологія виготовлення деталей виробів [Текст]: навч. пос. / В. В. Божидарнік, Н. С. Григор'єва, В. А. Шабайкович. – Луцьк: Надтир'я, 2006. – 612 с.
11. Кусий, Я. М. Технологічне забезпечення фізико-механічних параметрів поверхневих шарів металевих довгомірних циліндричних деталей вібраційно-відцентровим зміцненням [Текст] : дис... канд. техн. наук / Я. М. Кусий. – Львів, 2002. – 260 с.
12. Durham, S. D. Cumulative damage models for system failure with application to carbon fibers and composites [Text] / S. D. Durham, W. I. Padgett. // *Technometrics*. – 1997. – Vol. 39, Issue 1. – P. 34–44. doi: 10.2307/1270770
13. McEvily, A. J. Metal failures: mechanisms, analysis, prevention [Text] / A. J. McEvily. – John Wiley & Sons, 2002. – 324 p.
14. Zohdi, T. I. An introduction to computational micromechanics [Text] / T. I. Zohdi, P. Wriggers. – Springer, 2005. – 198 p. doi: 10.1007/978-3-540-32360-0
15. Качанов, Л. М. Основы механики разрушения [Текст] / Л. М. Качанов. – М.: Наука, 1974. – 308 с.
16. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
17. Kundu, T. Fundamentals of fracture mechanics [Text] / T. Kundu. – CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2008. – 304 p.
18. Шульженко М. Г., Методологія розрахункової оцінки індивідуального ресурсу парових турбін ТЕС і ТЕЦ [Текст] / М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Ю. І. Матюхін, О. В. Пожидаєв. – Цільова комплексна програма НАН України

- «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій». Збірник наукових статей з результатами, отриманими в 2007–2008 рр. – К.: 2009. – С. 682–686.
19. Лебедев, А. А. Метод диагностики состояния материала по параметрам рассеяния характеристик твердости [Текст] / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Завод, лаб. – 2003. – № 12. – С. 49–51.
 20. Lebedev, A. A. A new method of assesment of material degradation during its operating time [Text] / A. A. Lebedev, N. R. Muzyka, N. L. Volchek // Zaliznychnyi Transport Ukrainy. – 2003. – Vol. 5. – P. 30–33.
 21. Кузін, О. Вплив умов отримання виливків на формування технологічних пошкоджень [Текст]: тези доповідей / О. Кузін, Я. Кусий, В. Топільницький / 12-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові, 2015. – С. 115–116.
 22. Кузін, О. А. Структура і мікзеренна пошкоджуваність сталей [Текст] / О. А. Кузін, М. О. Кузін // Українська академія друкарства, наукові записки. – 2013. – № 4 (45). – С. 99–115.
 23. Куликов, Д. В. Физическая природа разрушения [Текст]: учеб. пос. / Д. В. Куликов, Н. В. Мекалова, М. М. Закиричная. – Уфа: УГНТУ, 1999. – 239 с.