

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ВИЛИВКІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ В ПІЩАНИХ ФОРМАХ

Кузін О. А., Кусий Я. М., Кузін М. О.

1. Вступ

В умовах ринкових відносин пріоритетне значення має конкурентоздатність виробів, яка визначається не лише якісно-економічними показниками, а й характеристиками надійності. Характеристики надійності закладаються при проектуванні виробів, забезпечуються при їх виготовленні, але проявляються тільки під час експлуатації деталей і машин [1–6].

Сучасне машинобудування, яке активно розвивається в напрямку створення автоматизованих систем отримання деталей, готових виробів, вимагає використання нових або традиційних матеріалів з підвищеним комплексом конструкційних і функціональних характеристик. Міцність і надійність складних технічних виробів залежить від комплексу факторів, які пов'язані з властивостями матеріалів, геометричними параметрами конструкцій та технологіями їх виготовлення.

Відсутність методів перенесення даних, що характеризують властивості матеріалів, на їх поведінку в навантажених конструкціях в практиці їх розрахунків замінюються недостатньо обґрунтованими коефіцієнтами запасу міцності. Розвиток інформаційного забезпечення машинобудування дає можливість отримання високотехнологічних виробів з використанням гнучких технологій при мінімальних витратах. Такий підхід ґрунтується на використанні багатфункціональних комп'ютерних систем, що узгоджено виконують об'ємне конструювання виробу (CAD), розрахункове обґрунтування його надійності та працездатності (CAE), підготовку технологічних процесів виготовлення (CAM) та керування інженерним проектом (PDM).

Програми комп'ютерного інженерного аналізу CAE дозволяють на підставі розрахункового обґрунтування формулювати нові підходи до вибору матеріалів та вдосконалення технологій їх обробки для підвищення експлуатаційної довговічності виробів. Слід відзначити, що використання цих програм обмежується відсутністю встановлених взаємозв'язків технологічної спадковості із етапами життєвого циклу деталей і машин, тому дослідження в цьому напрямку є актуальними.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – технологічна пошкоджуваність виливків з алюмінієвого сплаву ВКЛЖС-2, що отримані в піщаних формах. Виливки із досліджуваного сплаву використовуються для виготовлення деталей, зокрема поршнів двигунів внутрішнього згорання, що працюють в умовах знакозмінних навантажень, контактної взаємодії та зношування. Внаслідок структурної спадковості пошкодження, що утворюються в умовах лиття, можуть розвиватися при наступній обробці різанням та експлуатації виробів.

В проблемі загального аналізу матеріалів, технологій і конструкцій значний інтерес представляє неоднорідність структури, яка формується під час кристалізації сплавів залежно від умов тепловідведення. Елементами такої структури є первинні зерна, їх границі, пори, раковини, утворення та властивості яких залежать від ліквідації компонентів сплавів і особливостей їх кристалізації. При проектуванні деталей розрахунок конструкційної міцності проводиться з позицій механіки суцільних середовищ без врахування технологічної дефектності металічного матеріалу та нерівномірного розподілу властивостей в макрооб'ємі.

Разом з тим неоднорідність фізико-хімічного та технологічного походження впливає на конструкційну міцність деталей і виробів, але її вплив до кінця не вивчений. Прогнозування надійності деталей і машин на основі впровадженням PLM-концепцій вимагає експериментального дослідження та теоретичного аналізу впливу властивостей локальних об'ємів конструкційних матеріалів на їх поведінку при технологічних обробках і експлуатації.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – визначення технологічної пошкоджуваності різних зон виливків з алюмінієвих сплавів, отриманих литтям в піщані форми.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Проведення аналізу сучасних концепцій оцінювання пошкоджуваності металічних матеріалів.
2. Планування та реалізація мікроструктурних досліджень і технологічної пошкоджуваності різних зон вилитих заготовок.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Пріоритетним завданням при проектуванні раціональних технологічних процесів виготовлення деталей машин є взаємодія (узгодження) їх якісних і кількісних показників із забезпеченням високої продуктивності процесу та максимально можливого завантаження технологічного обладнання [2].

Залежність експлуатаційних властивостей виробів від показників їх якості є складною за наступних причин [7, 8]:

- 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.

Дослідженнями [8] встановлено, що недостатня якість процесів розроблення концепції виробу та підготовки його виробництва зумовлює 80 % всіх дефектів виробництва й використання виробів. Відмови під час гарантійного терміну деталей машин маже в 60 % випадків безпосередньо пов'язані із помилковими, незавершеними розробками та недотриманням технічних вимог.

Тому в стандарті ISO 9001:2008 зроблений акцент на інтегрування усіх дій (операцій). При цьому центр ваги робіт переноситься з функцій на процес, що

забезпечує єдність керування, вдосконалення організаційної культури та дозволяє ефективно впроваджувати PLM-технології [9].

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 [9, 10].



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

Однак при аналізі впливу технологічної спадковості на параметри якості кінцевого виробу недостатньо враховується роль заготівельних операцій [3, 9]. Дослідженнями [11] встановлено, що структура та властивості заготовок тісно пов'язані із спадковістю металу в рідкому стані. Лише 25 % властивостей шихти передається заготовці, а 75 % формується під час заливання та затверднення сплаву при охолодженні.

Завдяки успіхам теорії та практики ливарного виробництва, зокрема, досягненням ливарного металознавства, в машинобудуванні широко використовують литі заготовки замість деформованих.

Принципово важливою особливістю ливарних сплавів порівняно із деформівними є їх можливість забезпечувати високі характеристики механічних властивостей металу виливків без використання пластичної деформації, від якої залежить високий рівень міцності і пластичності після деформування. Пов'язано це з тим, що при пластичній деформації відбуваються суттєві якісні зміни литої структури. Зокрема, руйнуються та подрібнюються первинні зерна, неметалічні включення в об'ємі зерен, а також неметалічні прошарки на границях первинних зерен, усувається пористість і зменшується хімічна неоднорідність.

При відсутності пластичної деформації виливків їх поведінка під час технологічних обробок і експлуатації визначається структурою, яка була деформована після первинної кристалізації та повного затверднення металу.

Розвиток сучасного машинобудування характеризується зростанням ролі забезпечення проектних етапів інформацією про властивості і поведінку матеріалів при визначених технологічних режимах їх обробки та експлуатації. Це вимагає розроблення методів комп'ютерного моделювання структури, властивостей та обробки матеріалів, а також інтерпретації переведення в комп'ютерні

моделі САЕ. Слід відмітити, що зв'язок між факторами, які впливають на якість виробів, і їх поведінкою при експлуатації на рівні математичних моделей є до кінця не розробленим, що ускладнює комп'ютерне проектування [12, 13].

На всіх етапах конструювання та підготовки виробництва машинобудівної продукції в інтегрованих середовищах CAD/CAE/CAM/PLM виникає потреба враховувати та аналізувати поведінку матеріалів [14], ставляться питання про сумісне конструювання матеріалів і машинобудівних виробів [15, 16]. Сучасні методи моделювання ливарних технологій дозволяють точно розраховувати температурні поля та прогнозувати усадкові дефекти у виливках. Але існуюче програмне забезпечення не може надійно визначати зони руйнування в ливарних сплавах з врахуванням факторів, що впливають на зародження і розвиток тріщин. В зв'язку з цим потрібні експериментальні та теоретичні розробки для уточнення математичних моделей і розроблення таких комп'ютерних програм.

Високотемпературні дефекти утворюються при охолодженні сплавів внаслідок стрибкоподібного збільшення густини металу при фазовому переході з рідкого в твердий стан. На заключному етапі затверднення, з наближенням до температури солідус при досягненні певної кількості твердої фази виникає жорсткий каркас з ізольованими об'ємами рідкої фази.

Розтяг рідкої фази в межах двофазної зони зростає із зростанням твердої фази, що сприяє фільтрації розплаву в міждендритний простір. Коли доступ рідини припиняється, створюються умови для формування мікропор, виділення в них газів. З утворенням жорсткого каркасу починається ливарне усадження. Від початку усадження до температури солідус існує ефективний інтервал кристалізації, в якому формуються усадкові дефекти у вигляді раковин, мікропор і кристалізаційних тріщин. Такі дефекти є невід'ємною частиною неоднорідної структури ливарних сплавів. Вони мають значний вплив на термін експлуатації вилитих деталей, що повинно бути відображено в розрахунках надійності та працездатності виробів.

При виготовленні деталей машин слід враховувати, що структура матеріалів формується під дією технологічних процесів в неідентичних умовах для окремо взятих мікроб'ємів і областей. Це призводить до просторової неоднорідності структури і полів фізико-механічних властивостей на всіх розмірних рівнях від макро- до мікроскопічних. Для оптимізації технологічних процесів і підвищення експлуатаційної надійності матеріалів виливків необхідно встановити зв'язок між їх неоднорідною структурою та механічними властивостями, дати кількісну оцінку ефективності міцності макрооб'ємів готової деталі.

Ефективна міцність неоднорідно структурованого матеріалу відображає мінімальне руйнуюче навантаження та лімітується локальною міцністю найпослабленіших мікроб'ємів. Мікропори та мікротріщини, що з'являються в сплавах при кристалізації, можуть знижувати міцність литих заготовок і ініціювати руйнування при виконанні наступних після лиття технологічних операцій обробки заготовок або експлуатації готових виробів.

Важливу роль під час механічного оброблення деталей відіграє конструктивна спадковість. Її слід враховувати при розробленні технологічних процесів, а

також на стадії проектування високоточних деталей. Це дозволяє передбачати та керувати похибкою форми й взаємного розташування поверхонь виробів [13].

Вже на заготівельних операціях, зокрема під час механічної та термічної обробках, формуються дефекти структури, які при експлуатації конструкції починають інтенсивно розвиватися, зароджуючи небезпечні пошкодження у вигляді пор і мікротріщин. Розвиток теорії накопичення розсіяних пошкоджень (дефектів) дає можливість проводити аналіз причин погіршення характеристик фізико-механічних властивостей матеріалів виробів.

Формування технологічних пошкоджень на заготівельних операціях, зокрема ливарних, їх розвиток при механічному обробленні та експлуатації та зміна в цих умовах надійності деталей і машин вивчені недостатньо.

5. Методи дослідження

Локальна природа утворення дефектів і тріщин в умовах лиття обумовлює потребу в дослідженні процесу накопичення пошкоджень і утворення тріщин в матеріалах при отриманні виливків.

Багатостадійний процес руйнування металів містить наступні етапи [17–20]:

- 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 заданих на границях заготовки навантаженнях і переміщеннях.

Пошкоджуваність W у більшості досліджень причин руйнування матеріалу в процесі експлуатації не пов'язується із структурою. Лише при застосуванні енергетичних підходів для опису процесів накопичення пошкоджень [21, 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 пошкоджень, є скалярні параметри – енергія пошкоджуваності по тілу зерна W_p і енергія пошкоджуваності по границях зерен W_n :

$$W_k = \int_0^t w_k, \quad k = p, n. \quad (1)$$

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

$$0 \leq W_p \leq 1, \quad (2)$$

$$0 \leq W_n \leq 1. \quad (3)$$

Загальна пошкоджуваність матеріалу W :

$$0 \leq W \leq 1. \quad (4)$$

Приріст пошкоджуваності:

$$\Delta W = dW_n + dW_p, \quad (5)$$

де $dW_n = dW_n(T, W_n, W_p)$ і $dW_p = dW_p(T, W_n, W_p)$.

Загальний приріст пошкоджуваності:

$$\Delta W = dW_n + dW_p, \quad (6)$$

$$\Delta W_n = \Delta W_{nR} + \Delta W_{n\delta}, \quad (7)$$

$$\Delta W_p = \Delta W_{pR} + \Delta W_{p\delta}, \quad (8)$$

де ΔW_{nR} , $\Delta W_{n\delta}$ – прирости зернограничної пошкоджуваності відповідно за рахунок в'язко-пластичного деформування і в результаті зміни умов деформування;

ΔW_{pR} , $\Delta W_{p\delta}$ – прирости внутрішньозеренної пошкоджуваності відповідно за рахунок в'язко-пластичного деформування і в результаті зміни виду напруженого стану і температури.

Для визначення ступеню пошкоджуваності матеріалу W в процесі напрацювання використовують прямі (методи металографії, виважування) і побічні (акустичної емісії, омичного опору) методи вимірювань механічних властивостей металу без руйнування. Їх застосування призводить до великих похибок, оскільки зв'язок між вимірюваними параметрами і характеристиками структурного стану для широкого класу матеріалів неоднозначний.

Аналіз та оцінку фізичної неоднорідності структури, пошкоджуваності різних зон вилитих заготовок проводили з використанням методу ЛМ-твердості. Згідно цього методу за параметр пошкоджуваності прийнято ступінь розсіювання характеристик механічних властивостей матеріалу після напрацювання при різних рівнях напружень. Розсіювання результатів вимірювань, виконаних однаковими приладами в ідентичних умовах, є більш представницькими відносно кореляції механічних властивостей характеристики матеріалу та стану структури, ніж абсолютні значення характеристик. Даний метод найпростіше реалізувати, використовуючи як механічну характеристику твердість, значення якої застосовують для непрямой оцінки властивостей матеріалів [21, 22].

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 [21, 22].

Коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) розраховують за формулою [21]:

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 \cdot S(\lg(H))}, \quad (9)$$

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

$$S(\lg(H)) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\lg(H_i) - \overline{\lg(H)})^2}, \quad (10)$$

$$\overline{\lg(H)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \lg(H_i). \quad (11)$$

В даній роботі також досліджували вплив структури матеріалу на його пошкоджуваність W , яку оцінювали за формулою:

$$W = \frac{m_{\max} - m_i}{m_{\max}}, \quad (12)$$

де m_i – значення коефіцієнта Вейбулла на i -й лінії (площині) вимірювань; m_{\max} – максимальне значення коефіцієнта Вейбулла для серії вимірювань.

6. Результати дослідження

Для експериментальних досліджень відлили заготовки у піщану форму розмірами 165x155x20 мм з матеріалу АК21М2,5Н2,5 (ВКЖЛС-2) ГОСТ 1853-93. Із заготовки відрізували зразок 155x20x20 мм та фрезерували базову поверхню на вертикально-фрезерному верстаті 6Р12 кінцевою фрезою $\varnothing 30$ мм (режими різання: $t=2$ мм, $S=270$ мм/хв., $n=300$ хв⁻¹).

На двох поверхнях, протилежних до базової, проводили підготовку до мікроструктурних досліджень за стандартною методикою, яка описана в роботах [17, 18].

Після цього вимірювали твердість у перерізах, паралельних базовій площині, з двох сторін (край вилівка та внутрішня сторона) на приладі ТР-5006 (Росія) за допомогою кульки $\varnothing 3,175$ мм при навантаженні 588,4 Н. Заготовка після вимірювання твердості представлена на рис. 2.

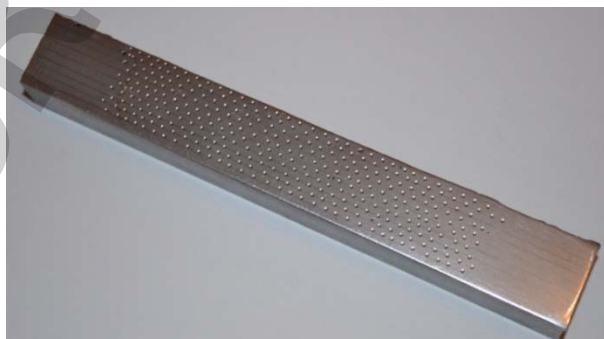


Рис. 2. Заготовка після вимірювань твердості на приладі ТР-5006 (Росія)

За результатами досліджень було розраховано коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) за формулою (9) і пошкоджуваність матеріалу вилівка W за фор-

мулою (12) в середовищі Mathcad 15. За отриманими даними побудували графіки залежності $m=f(h)$ і $W=f(h)$, що наведені на рис. 3, 4.

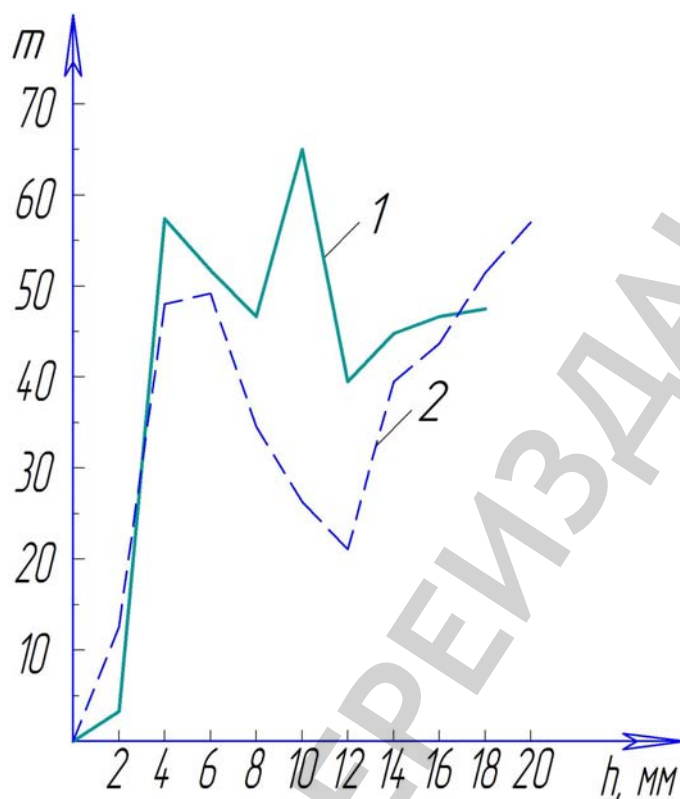


Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта гомогенності (m) від глибини вимірювання для сторін заготовки: 1 – внутрішньої; 2 – зовнішньої

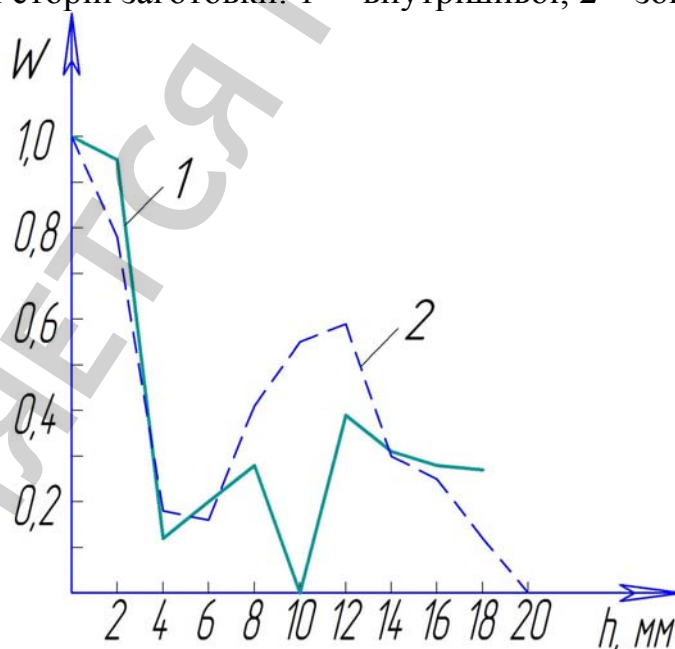


Рис. 4. Графік залежності пошкоджуваності матеріалу W від глибини вимірювання для сторін заготовки: 1 – внутрішньої; 2 – зовнішньої

Після цього досліджували інтенсивність (щільність) дефектів (пошкоджень) поверхні для внутрішньої сторони заготовки на електронному мікроскопі (збільшення 15 раз) (рис. 5–8). За результатами досліджень побудували

графіки залежності $N=f(d)$ (N , d – відповідно кількість і розміри дефектів структури), що наведені на рис. 10.

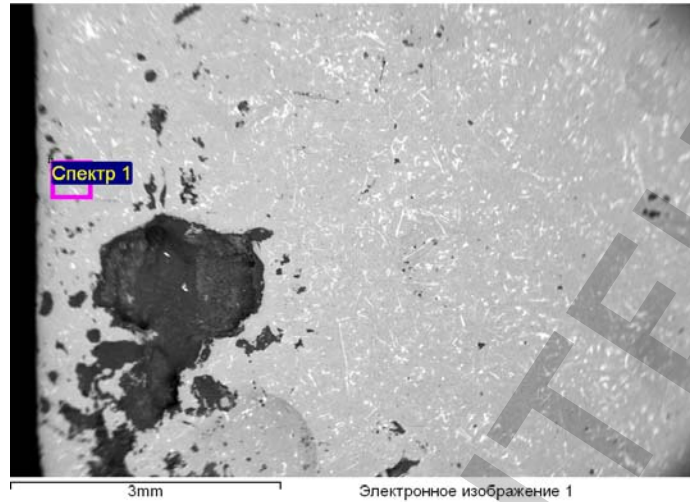


Рис. 5. Структура у I зоні від поверхні вилівка

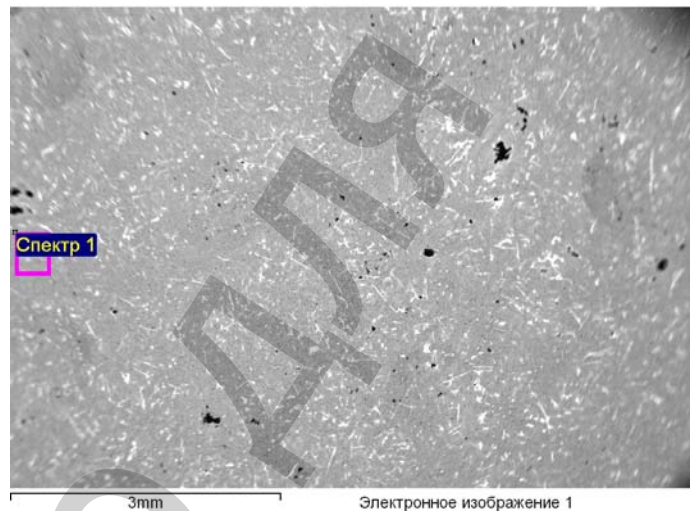


Рис. 6. Структура у II зоні від поверхні вилівка

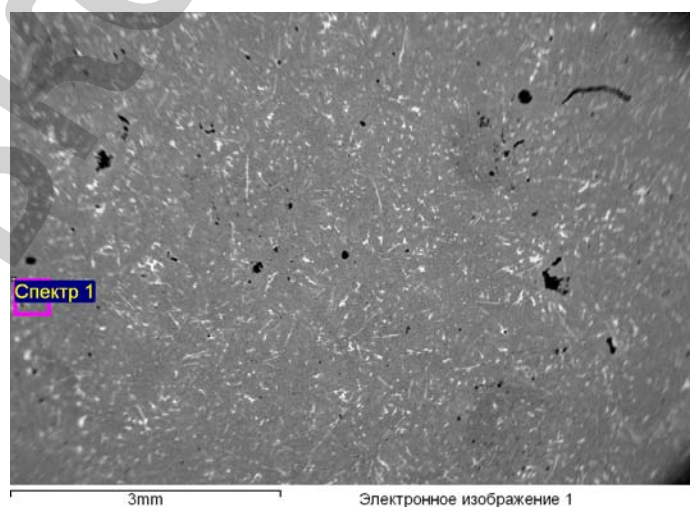


Рис. 7. Структура у III зоні від поверхні вилівка

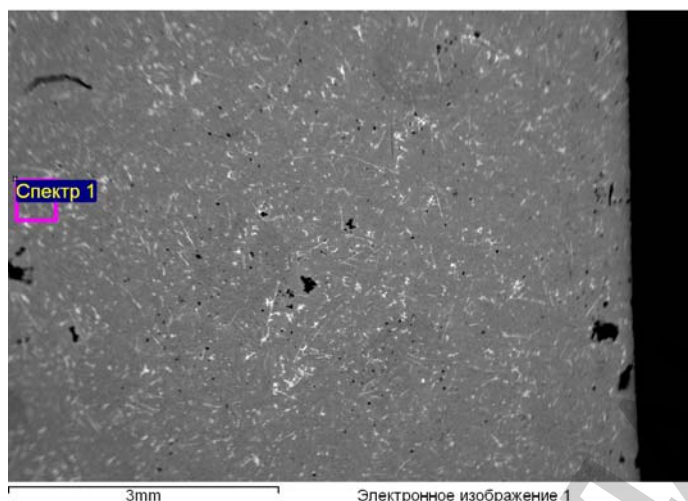


Рис. 8. Структура у IV зоні від поверхні вилівка

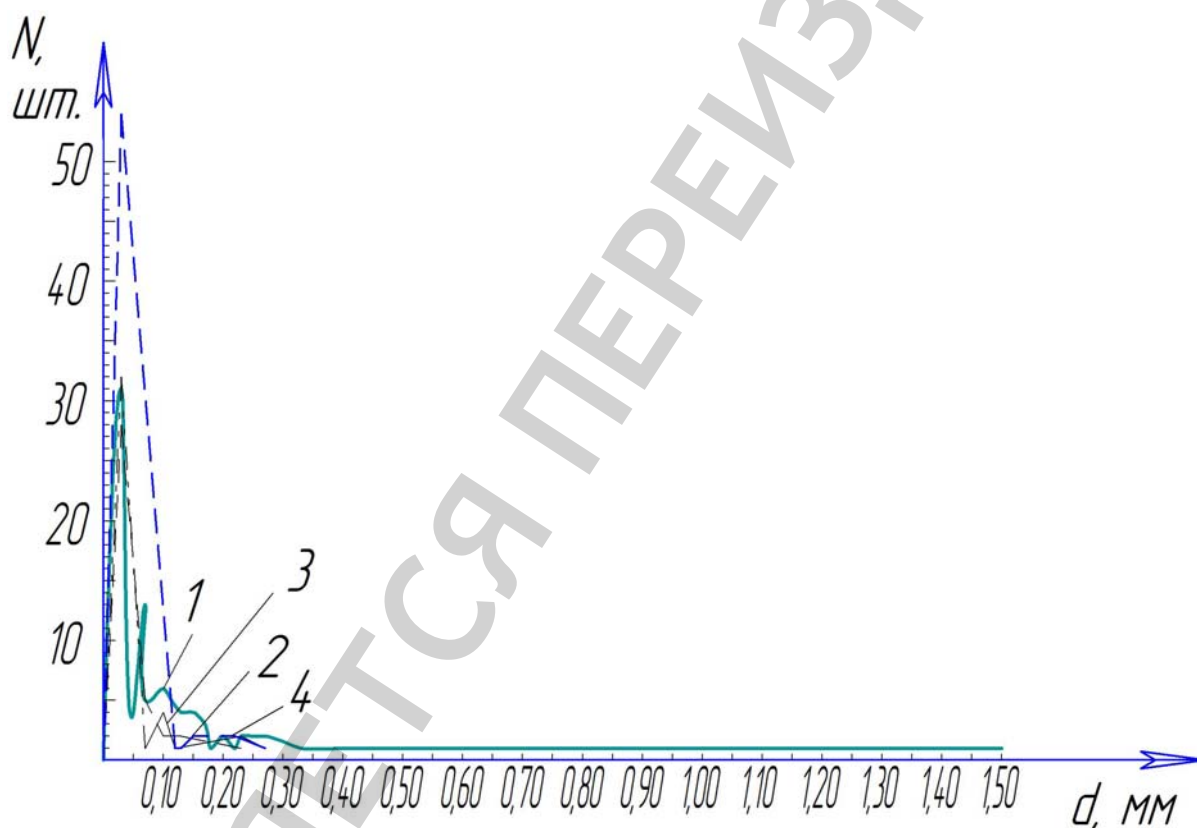


Рис. 9. Залежність кількості дефектів N від їх розмірів d для зон від поверхні вилівка: 1 – I; 2 – II; 3 – III; 4 – IV

Наклавши сітку із кроком 10 мм на фотографії структуру матеріалу у I–IV зонах, розрахували відносну пористість (дефектність) структури P , %, за формулою:

$$P = \frac{L_{\text{деф.}}}{L_{\text{заг.}}}, \quad (13)$$

де $L_{\text{деф.}}$ – загальна довжина ліній сітки із дефектами; $L_{\text{зар.}}$ – загальна довжина ліній сітки.

Графік залежності $P=f(h)$ для внутрішньої сторони заготовки представлено на рис. 10.

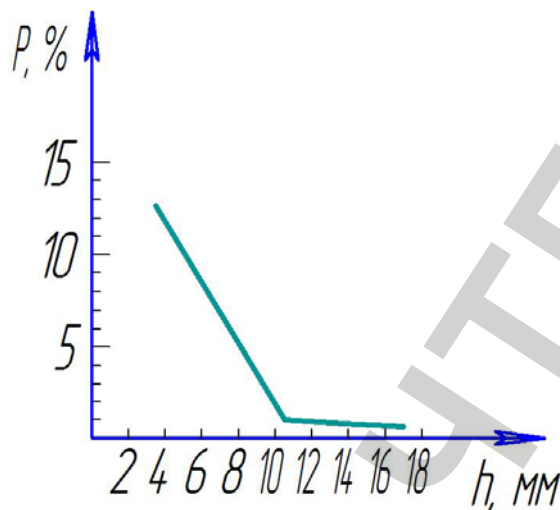


Рис. 10. Залежність відносної пористості (дефектності) структури P досліджуваного зразка

Отримані результати показали, що найбільша кількість технологічних пошкоджень у вилитій заготовці утворюється на глибині до 2 мм від поверхні, яка закристалізувалася 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), а також великими значеннями пошкоджуваності W (рис. 4).

При подальшому переміщенні вглиб матеріалу (від 2 до 4 мм) у зоні I 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. 4) 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 вилівка обумовлено тим, що ця зона знаходиться посередині вилівка, де внаслідок тепловідведення по всім напрямкам формується дезорієнтована мікроструктура первинних кристалів. В зонах утворення направлених кристалітів пошкоджуваність є меншою.

Технологічні дефекти присутні у всіх досліджуваних зонах матеріалу (рис. 5–9). 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 пошкоджуваних вказує і відносна дефектність структури Р, яка у зоні I є більшою майже в 10 разів порівняно із іншими зонами (рис. 10).

Спектральний аналіз показав підвищення вмісту кисню та зменшення алюмінію у верхній частині виливка (зона I) порівняно з нижньою частиною (зона IV) (рис. 5, 8, табл. 1).

Таблиця 1

Вміст елементів у зонах I, IV досліджуваного виливка

Вміст хімічних елементів у зоні I			Вміст хімічних елементів у зоні IV		
Елемент	Ваговий	Атомний	Елемент	Ваговий	Атомний
O K	8,46	13,70	O K	6,12	10,21
Al K	69,73	66,96	Al K	69,79	69,04
Si K	20,28	18,71	Si K	19,86	18,87

Розподіл інших елементів у всіх зонах загалом є рівномірним.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. В даній роботі запропоновано використати метод LM-твердості для оцінювання пошкоджуваності виливків, оскільки під час виготовлення заготовок формується неоднорідна структура та утворюються дефекти. Цей метод був розроблений в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України (Київ, Україна) [21, 22] для дослідження деформованих матеріалів. Метод LM-твердості дасть можливість кількісно визначити технологічні пошкоджуваності виливків залежно від особливостей конструкцій ливарних форм, тепловідведення, підготовки розплавів, умов їх розливання у форми. Кількісна оцінка пошкоджуваності також дає можливість проводити вибір економічно обґрунтованих технологічних рішень для підвищення довговічності виробів.

Weaknesses. Недоліком методу LM-твердості є необхідність проводити вирізання зразків із окремих об'ємів виливка, пошкоджуваність яких необхідно дослідити.

Opportunities. Впровадження методу LM-твердості на підприємствах машинобудівного профілю дасть можливість скоротити час на конструкторсько-технологічну підготовку виробництва при впровадженні технологій лиття, сприятиме розвитку інформаційного забезпечення машинобудування в Україні. Подальші дослідження в цьому напрямку необхідно спрямувати на встановлення безпосередніх зв'язків між деякими показниками надійності, які інтегрально описуються пошкоджуваністю матеріалу W та технологічними параметрами заготівельних операцій мехобробки.

Threats. Існуючі фізичні методи не дають можливість кількісно оцінювати пошкоджуваність вилитих матеріалів, оскільки зв'язок між параметрами, що вимірюються, та структурним станом є неоднозначним. При розклинюванні матеріалу індентором приладу для вимірювання твердості можна оцінювати три-

мку здатність локальних областей, пошкоджуваність яких є різною. Тому необхідний розвиток методу LM-твердості для комп'ютерного дослідження явищ, що впливають на надійність і умови руйнування вилитих заготовок при їх отриманні та обробленні.

8. Висновки

1. На підставі проведеного аналізу сучасних концепцій оцінювання пошкоджуваності металічних матеріалів показано, що оцінку технологічної пошкоджуваності різних зон вилитих заготовок із складною просторовою геометрією, які містять масивні теплові вузли та тонкі стінки, доцільно проводити за ступенем розсіювання характеристик твердості. Технологічна пошкоджуваність заготовок, отриманих в піщаних формах, змінюється в широких межах і в основному залежить від умов кристалізації їх окремих об'ємів:

- розподілу температурних полів;
- спрямування тепловідведення;
- особливостями живильника металу рідкою фазою під час кристалізації.

Проведено аналіз впливу конструкції ливарної форми на утворення технологічних пошкоджень. Збільшення віддалі від живильника сприяє зростанню, а прискорена кристалізація і спрямоване тепловідведення зменшенню технологічних пошкоджень об'ємів виливка при затвердінні.

2. На основі планування та реалізації мікроструктурних досліджень встановлено, що пошкоджуваність матеріалу W як на заготівельній операції, так і на операціях подальшого механічного оброблення, служить параметром, який кількісно оцінює характеристики надійності виробів, зокрема безвідмовності. Зокрема, у приповерхневому шарі на глибині 2 мм технологічна пошкоджуваність у 1,3–6,5 разів вища, ніж для основного матеріалу.

Література

1. 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.
2. Кусий, Я. М. Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення для технологічного забезпечення безвідмовності деталей машин [Текст] / Я. М. Кусий, А. М. Кук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 1/7 (73). – С. 41–51. doi:[10.15587/1729-4061.2015.36336](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36336)
3. Кусий, Я. М. Вплив технологічного маршруту оброблення на формування міжзеренної пошкоджуваності виливків [Текст] / Я. М. Кусий, О. А. Кузін, М. О. Кузін // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 1/5 (79). – С. 39–47. doi:[10.15587/1729-4061.2016.59845](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59845)
4. Кузін, Н. О. Об одной математической модели изменения эксплуатационных свойств материала [Текст] / Н. О. Кузін // Прикладная механика. – 2015. – Т. 51, № 4. – С. 125-132.
5. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст] / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

6. Суслов, А. Г. Инженерия поверхности деталей [Текст] / под ред. А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
7. Проников, А. С. Надежность машин [Текст] / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
8. Хрулиндик, Д. С. FMEA – инструмент влияния на качество процессов обслуживания производства [Текст] / Д. С. Хрулиндик, Э. А. Петровский // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 6. – С. 39.
9. Кузін, О. А. Вплив технологічної спадковості на параметри надійності виробів [Текст] / О. А. Кузін, Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 1/1 (21). – С. 15–21. doi:[10.15587/2312-8372.2015.37678](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.37678)
10. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении [Текст] / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченко. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
11. Божидарнік, В. В. Технологія виготовлення деталей виробів [Текст]: навч. пос. / В. В. Божидарнік, Н. С. Григор'єва, В. А. Шабайкович. – Луцьк: Надстир'я, 2006. – 612 с.
12. Ogorodnikova, O. M. Possibilities of Siemens PLM software for robotics research and production management [Text] / O. M. Ogorodnikova // Proceedings of Russian-Korea scientific workshop «Advanced computer and information technologies». – Ekaterinburg: UrFU, 2012. – P. 122–128.
13. Skoogh, A. Input data management in simulation – Industrial practices and future trends [Text] / A. Skoogh, T. Perera, B. Johansson // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2012. – Vol. 29. – P. 181–192. doi:[10.1016/j.simpat.2012.07.009](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.07.009)
14. Wang, L. Data Representation of Machine Models [Text] / L. Wang // Dynamic Thermal Analysis of Machines in Running State. – London: Springer-Verlag, 2013. – P. 11–29. doi:[10.1007/978-1-4471-5273-6_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5273-6_2)
15. McDowell, D. L. Simulation-assisted materials design for the concurrent design of materials and products [Text] / D. L. McDowell // Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2007. – Vol. 59, № 9. – P. 21–25. doi:[10.1007/s11837-007-0111-7](https://doi.org/10.1007/s11837-007-0111-7)
16. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин [Текст] / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 319 с.
17. 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, № 1. – P. 34–44. doi:[10.2307/1270770](https://doi.org/10.2307/1270770)
18. McEvily, A. J. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention [Text] / A. J. McEvily. – Ed. 2. – John Wiley & Sons, 2013. – 480 p. doi:[10.1002/9781118671023](https://doi.org/10.1002/9781118671023)
19. Zohdi, T. I. An Introduction to Computational Micromechanics [Text] / ed. by T. I. Zohdi, P. Wriggers // Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. – Springer, 2005. – 198 p. doi:[10.1007/978-3-540-32360-0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32360-0)
20. Kundu, T. Fundamentals of Fracture Mechanics [Text] / T. Kundu. –

Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2008. – 304 p.

21. Лебедев, А. А. Метод диагностики состояния материала по параметрам рассеяния характеристик твердости [Текст] / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – № 12. – С. 49–51.

22. Lebedev, A. A. A new method of assessment 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.

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ