

дозволить підвищити ефективність роботи екскаватора і подолати негативний вплив явища ущільнення ґрунтів в процесі копанні.

### Список літератури

1. **Веснін А.В.** Моделювання процесу пересування екскаватора з чотирьохопорним крокуючим рушієм / **А.В.Веснін, І.В.Крупко, В.В.Сегін** // Вісник Криворізького національного університету. - 2017. - Вип. 44. - С. 54-58.
2. **Веснін А.В.** Методика визначення показників складності маршруту руху, ефективності роботи та узгодженості параметрів системи "двигун-трансмсія" кар'єрних самоскидів / **А.В.Веснін, О.Д.Почужевський** // Вісник Криворізького національного університету. - 2012. - Вип. 32. - С. 136-139.
3. **Веснін А.В.** Обґрунтування передаточних чисел редуктора властивостей колеса кар'єрного самоскида у відповідності до складності трас руху / **А.В.Веснін, Ю.А.Монастирський** // Наукові нотатки. - 2014. - Вип. 45. - С. 72-78.
4. **Баладінський В.Л.** Теорія руйнування робочих середовищ: Підручник / **В.Л.Баладінський, Ю.М.Абрашкевич** // К.:КНУБА, 2000. - 91с.
5. **Степанов Е.А.** Привід перетворення безперервного обертального руху на крокове обертання / **Е.А. Степанов, В.Г.Крупко, Г.І.Бондаєвський, В.С.Шнюков** // А.С. № 1234308. - Бюл. Винах. № 20, 1986.
6. **Дорохов М.Ю.** Хвильовий ланцюговий редуктор / **М.Ю.Дорохов, В.Г.Крупко** // Патент України на корисну модель № 68714 МПК Е 02F 16 G 13/00 від 16 08.2004 р.
7. **Крупко В.Г.** Хвильові ланцюгові передачі у приводах землерийних машин / **В.Г.Крупко, Н.О.Кучер** // Вестник ХНАДУ: зб. наук. пр. - Вип.73 : Харків, 2016. - С. 184-189.
8. **Крупко В.Г.** Розробка привода сучасних підйомно-транспортних машин із хвильовим ланцюговим передаточним механізмом / **В.Г.Крупко, М.Ю.Дорохов** // Підйомно-транспортна техніка. №2(10). - Дніпропетровськ, 2004. - С. 41-45.
9. **Альошичев П.В.** Натискний механізм екскаватора / **П.В. Альошичев, М.Ю.Дорохов, В.Г.Крупко** // Патент України на корисну модель № 67932 МПК Е 02 F 3/08 від 15.07.2004 р.
10. **Суглобов В.В.** Застосування хвильових ланцюгових передач в приводах технологічних машин / **В.В.Суглобов, В.Г. Крупко** //Наука та виробництво : міжвуз. темат. зб. наук. пр. - Вип. 25: ДВНЗ «ПДТУ». - Дніпро, ПДТУ, 2023. - С. 44 - 49

Рукопис подано до редакції 21.03.24

УДК 669.71:621.791.92:621.431

М.О. ГНАТЕНКО, ст. викладач

Національний університет «Запорізька політехніка»

## УСУНЕННЯ ЛИВАРНОГО БРАКУ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

**Мета роботи.** впровадити ефективний метод усунення ливарного браку та дефектів що дозволяє відновлювати пошкоджені сегменти виливків. Було встановлено що межа міцності і відносне подовження наплавленого матеріалу ЕП648 знаходиться на рівні основного литого сплаву ВХ4Л і складає 83-100 Н і  $\delta=17-20\%$ .

**Методи дослідження** проводилося за допомогою плазмового пальника та джерела живлення Starweld, робота Mitsubishi порошком ЕП648 на поверхню деталі зі сплаву ВХ4Л товщина наплавленого шару складала 8 мм, висота 1,2 мм, діаметр наплавлення 570 мм. Механічні властивості межі міцності і відносного подовження були визначені на розривній машині INSTRON. Дослідження мікроструктури проводилося за допомогою мікроскопів Stemi 200-c, Observer.D1m (Zeiss, Німеччина) при збільшеннях від  $\times 100$  до  $\times 1000$ . При вивченні структурних складових в сплавах застосували комплексну методiku якісної й кількісної оцінки складових.

**Наукова новизна** полягає у отриманні нікелевих сплавів зі створенням специфічних металургічних фаз та структур на рівні литих фасонних виливків. Ці фази, включаючи гамма-твердий розчин, метастабільні карбіди та нітриди, відіграють важливу роль у поліпшенні механічних властивостей матеріалу. Гамма-твердий розчин відомий своєю високою стійкістю до деформації та відновлювальною здатністю, що робить його ідеальним для застосування у виробництві, де потрібна висока міцність. Метастабільні карбіди і нітриди дозволяють до структури сплаву додаткову зносостійкість та стійкість до впливу зовнішніх факторів.

**Практична значимість** полягає у значному розширенні можливостей ремонту і усунення дефектів литва багатогабаритних виливків.

**Отримані результати** успішно впроваджено технологію усунення ливарного браку для багатогабаритних деталей з нікелевих сплавів шляхом застосування методів мікроплазмового наплавлення, за рахунок усунення дефектів шляхом механічної обробки та нанесення додаткового шару матеріалу замість пошкодженого. Використання нікелевих сплавів із застосуванням методу наплавлення дозволяє забезпечити високу якість та надійність продукції при усуненні ливарних дефектів чи проведенні ремонту виробів.

**Ключові слова:** адитивні технології, нікелеві сплави, ливарне виробництво, усунення ливарного браку.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями** при виготовленні деталей методами литва, можуть виникати дефекти чи брак, що є закономірним явищем для будь-яких технічних процесів.

Дефекти лиття можуть виникати з різних причин, включаючи недосконалу конструкцію ливарної форми, виробничі помилки або фактори навколишнього середовища. Дефекти можуть виявлятися в різних формах, включаючи пористість, шорсткість поверхні, тріщини та короблення, що може вплинути на якість та функціональність кінцевого продукту[1-3].

На даному етапі існують такі методи виправлення ливарних дефектів як механічна обробка, зварювання, абразивна обробка.

Але дані методи можуть бути недоцільними особливо у випадках коли дефекти є критичними та розповсюджені на великій площі поверхні деталі[4-5].

**Аналіз досліджень і публікацій.** В останні роки сучасні технології ремонту та відновлення ливарних деталей методом плазмового наплавлення та адитивних технологій стали все більш популярними. Ці методи дозволяють швидко та ефективно відновити деталі, які раніше вважалися непридатними для використання.

Плазмова наплавка – це метод, при якому металевий порошок нагрівається до температури плавлення за допомогою плазмової дуги та наноситься на пошкоджену поверхню. Плазмова дуга розплавляє поверхню металу, далі в розплавлену ванну подається порошок що при затвердінні з'єднується з поверхнею деталі, створюючи новий шар металу на поверхні вилівку. Цей процес дозволяє відновлювати пошкоджені ділянки деталей з різних матеріалів, таких як сталь, алюміній, бронза та інші[5-7]. За допомогою методу мікроплазмового наплавлення можна виправляти дефекти, що виникають при ливарному виробництві, такі як недолив, чорноти, рихлоти на поверхні деталі, впливати на геометрію деталі змінюючи її розміри та форми.

**Постановка задачі** провести аналіз застосування методу мікроплазмового наплавлення при усуненні ливарних дефектів на прикладі кільцевої деталі з нікелевого сплаву ВХ4Л.

**Викладення матеріалу та результати.** В даному дослідженні процес наплавлення є керованим та автоматизованим за допомогою програмного та автоматизованого виробництва (САМ), та дозволяє забезпечити точний ремонт. Наплавлення відбувалося на роботизованому комплексі Starweld який складається з 1 – пальника та джерела живлення MagicWave; робота Mitsubishi, механізму подачі порошку, пульта управління; контролеру (рис. 1).

Експериментально склад карбідів і нітридів визначали на електронному мікроскопі Stemi с використанням системи енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу.

Механічні властивості межі міцності і відносного подовження були визначені на розривній машині INSTRON.

У даній статі буде розглянуте застосування методу порошкового наплавлення для усунення ливарного браку на прикладі деталі з жароміцного нікелевого сплаву ЕП648 (ХН50ВМТЮБ-ВИ) кожух камери згорання. Принцип дії процесу полягав в тому, що на робочому пульті задавався напрямок руху робота і швидкість наплавлення. При запуску процесу наплавлення починає подаватися порошок механізмом подачі і захисний газ [7-10].

Місце на деталі, яке схильне до утворення ливарних дефектів при заливці та охолодженні позначено цифрою 1 на рис 2. Для усунення дефекту, пошкоджене місце відрізалось та шліфувалося і зачищалося для забезпечення рівної поверхні під наплавлення.

Деталь встановлювалась на маніпулятор роботизованого комплексу, базувалася, та жорстко закріплювалась за допомогою затискачів.

Для досягнення необхідної геометричної форми необхідно було нанести 16 шарів матеріалу, висота одного шару матеріалу складає 1,2 мм. Додаткові уступи на деталі, наведені вище забезпечувалися подальшою механічною обробкою.



Рис. 1. Схема роботизованого комплексу

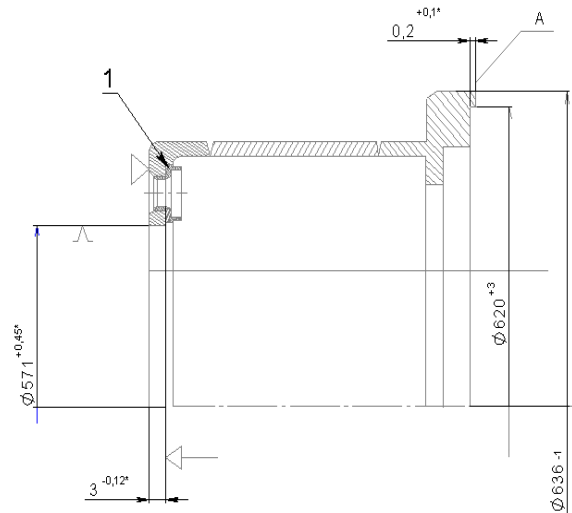


Рис. 2. Робоче креслення деталі

Процес відновлення деталей відбувався на наступних режимах наведених в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри режимів наплавлення

Параметри	№ прохода				
	1	2-3	3	4	5-16
Ток наплавлення, А	70-75	65-70	58-62	55-60	50-55
Діаметр вольфрамового електрода, мм	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Діаметр плазмоутворюючого сопла, мм	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Час імпульса, мс	300/160	300/160	300/160	300/160	300/160
Струм імпульса, А	2	2	2	2	2
Швидкість наплавлення, мм/сек.	1.6	1.7	1.75	1.8	1.8
Витрата пілотнога газу (аргон), л/мин	0.8-1.0	0.8-1.0	0.8-1.0	0.8-1.0	0.8-1.0
Витрата захисного газу (аргон), л/мин	10-12	10-12	10-12	10-12	10-12
Витрата плазмоутворюючого газу (аргон) л/мин	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8
Витрата транспортного газу (аргон), л/мин	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
Висота наплавленого шару, мм	1.2	1.2	1.7	1.6	1.5
Витрата порошка, г/мин	3.5-3.7	3.2-3.6	3.0-3.4	2.7-3.2	2.5-3.0
Фракція порошка, мкм	63-160	63-160	63-160	63-160	63-160

Параметри наведені вище є типовими для вирощування та відновлення деталей зі сплаву ЕП 648. В залежності від товщини отримуваної поверхні можуть змінюватися такі параметри як сила струму та швидкість наплавлення.

На рис. 3 представлена деталь корпусу камери згоряння виготовлена з нікелевого сплаву ЕП648, після процесу відновлення виливка.

На поверхні деталі можна побачити хвилеподібні взаємопов'язані шари, які характерні для напавленого нікелевого сплаву. Така геометрія виникає через термічний вплив дугового наплавлення на метал. В процесі вирощування висока температура розплавленого металу сприяє нерівності поверхні металевому шару та утворенню хвилеподібних структур на поверхні виробу.

Загальна структура напавленої поверхні нікелевого сплаву включає в себе металеві зерна, границі зерен, включення та дефекти. Оскільки якість напавленої поверхні має великий вплив на ефективність та надійність деталі, необхідно приділяти особливу увагу контролю параметрів процесу наплавлення та якості напавленого металу.

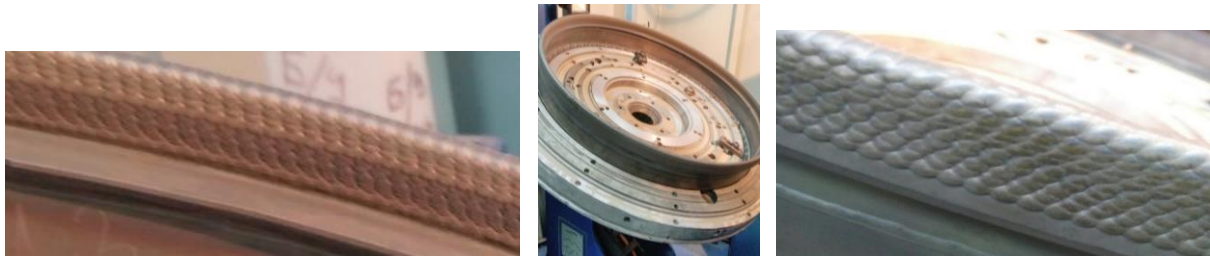


Рис. 3. Деталь після відновлення методом мікроплазмового наплавлення

Мікроструктура складається з  $\gamma$ -твердого розчину, метастабільних карбідів та нітридів. Розміри та розподіл фаз залежать від складу сплаву, швидкості наплавлення та температури охолодження (рис. 4).

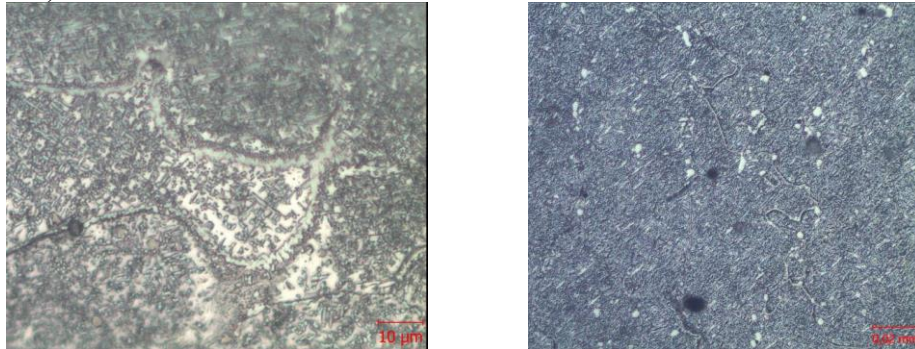


Рис. 4 Мікроструктура матеріала зразків зі сплаву ЕП648 (ВХ4Л)

Оскільки вміст нітридів та карбонітридів структури даного сплаву високий то мікроструктура має зернисту та колоноподібну форму, що обумовлено їх сильним впливом на зростання зерен та орієнтацію зерен при наплавленні. На мікрографах таких сплавів можна побачити дрібні частинки нітридів і карбонітридів, рівномірно розподілених у матриці  $\gamma$ -твердого розчину.

Для зняття напруги після наплавлення та підвищення механічних властивостей і мікроструктури, наплавлений нікелевий сплав піддавали термічній обробці, яка може включати в себе відпал, загартування і відпустку. Ці процеси дозволяють покращити твердість, зносостійкість та інші механічні властивості сплаву, а також змінити мікроструктуру та склад фаз.

Властивості отриманого з'єднання перевірялись на зразках плоского типу. На поверхню пластин з литого сплаву ВХ4Л наносилися шари матеріалу зі сплаву у вигляді порошку та дроту ЕП648.

З даних, наведених у табл. 2, видно, що механічні властивості зразків що досліджуються відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85 для сплаву ВХ4Л-ВИ. І задовільняють технологічним характеристикам що пред'являються до виливків.

**Висновки та напрям подальших досліджень.** Було відновлено деталь кожух камери згорання методом порошкового наплавлення, діаметр наплавлення складав 600 мм, ширина поверхні наплавлення складала 8 мм. для висота відновленої поверхні складала 20 мм. Мікроструктура напавленої поверхні складалася з  $\gamma$ -твердого розчину, метастабільних карбідів та нітридів. Розміри та розподіл фаз процесу наплавлення перебували у прямій залежності від складу сплаву, швидкості наплавлення та температури охолодження.

Механічні властивості напавленого матеріалу знаходилися на рівні ОСТ 1 90126-85 (для сплаву ВХ4Л-ВИ).

Даний метод можна використовувати для різних сплавів, включаючи сталь, алюміній та титан, що робить його універсальним варіантом усунення ряду дефектів лиття. Цей метод також

Таблиця 2  
Механічні властивості зразків зі сплаву типу ЕП648 (ВХ4Л)

Инд. номер образца	Механічні властивості при $t = 20^{\circ}\text{C}$	
	$\sigma_{\text{в}}, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$	$\delta, \%$
усл.№1	83,6	17,1
усл.№2	96,5	20,0
усл.№3	82,6	17,7
усл.№4	100,6	25,7
Норми ОСТ 1 90126-85 (для сплаву ВХ4Л-ВИ)	$\geq 80,0$	$\geq 4,0$

можна використовувати для нарощування або додавання матеріалу до виливки, що може бути корисним для ремонту зношених або пошкоджених деталей.

Окрім того, метод мікроплазмового наплавлення дозволяє усувати дефекти лиття з високою точністю, забезпечуючи точніший і послідовніший результат, ніж традиційні методи. Метод наплавлення також універсальний і може використовуватися для усунення широкого спектра дефектів лиття, включаючи пористість, тріщини та шорсткість поверхні.

### Список літератури

1. Гнатенко М.О., Чигілейчик С.Л., Сахно С.С. Виготовлення авіаційних деталей з жароміцних нікелевих сплавів методом адитивного плазмового наплавлення. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2021. №5(175). С. 48-51. DOI: 10.32620/akt.2021.5.06
2. Bintaо W., Zengxi P., Donghong D., Dominic C., Huijun L., Jing X., John N. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 35, October 2018, P. 127-139
3. М. Gnatenko, P. Zhemaniuk, I.Petrik, S. Sakhno, S. Chigileichik, V. Naumyk, O. Ovchinnikov, M. Matkovska Detecting the influence of heats sources on material properties when production a aviation parts by a directenergy deposition method. *Eastern–european journal of enterprise technologies*. 2019. 1/12(97). P. 49 – 54.
4. Gnatenko, M., Naumyk, V., Matkovska. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology*. 2019. P. 68 – 74
5. Leary M. Introduction to AM. In: Design for Additive Manufacturing. Elsevier; 2020. p. 1–6.
6. Prakash KS, Nancharaih T, Rao VVS. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. In: Materials Today: Proceedings. Elsevier Ltd; 2018. p. 3873–82
7. Aqib Muzaffar, S. K. Khadheer 3D and 4D printing of pH-responsive and functional polymers and their composites in 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials, 2020.
8. Li N, Huang S, Zhang G, Qin R, Liu W, Xiong H, et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. Vol. 35, Journal of Materials Science and Technology. Chinese Society of Metals; 2019. p. 242–69.
9. Mohammadreza Nematollahi, ... Mohammad Elahinia, in Metals for Biomedical Devices (Second Edition), 2019
10. Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. P. 641–647.

Рукопис подано до редакції 25.03.24

УДК 622.1: 534

Б.І. РИБАЛКО, канд. техн. наук, доц., А.В. БАКАЙ, аспірант  
Криворізький національний університет

## ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦІЇ МІКРОСЕЙСМІЧНОГО СИГНАЛУ

**Мета статті** є створення математичної моделі, яка описують процеси трансформації мікросейсмічних сигналів, розробка математичних рівнянь та алгоритмів, які відображають фізичні та геологічні процеси, які відбуваються в мікросейсмічних сигналах.

**Методи дослідження.** Збір та аналіз реальних мікросейсмічних сигналів для визначити їх характеристики та динаміку в різних геологічних умовах. Розроблення математичних моделей, які відображають фізичні процеси, що відбуваються у напружено-деформованому стані масиві, дозволяє вивчити вплив різних факторів на трансформацію мікросейсмічного сигналу.

Спектральний аналіз для вивчення частотних характеристик мікросейсмічного сигналу. Розробка математичних моделей, які відображають фізичні процеси, що відбуваються у глибинах Землі, дозволяє вивчити вплив різних факторів на трансформацію мікросейсмічного сигналу.

**Наукова новизна.** Встановлено нові залежності амплітуди, тривалості і частоти від відстані для мікросейсмічного сигналу.

**Практична значимість.** Динамічна модель трансформації мікросейсмічного сигналу важлива для покращення розуміння геологічних процесів та управління ризиками в активних сейсмічних регіонах. Зокрема, модель можна використовувати для моніторингу сейсмічної активності в реальному часі з визначенням відстані до геомеханічного явища, виявляти види сейсмічної активності за частотою (тріщини, заколів, мікроударів), виявлення динаміки незначних геологічних зрушень є важливим для оцінки потенціальних ризиків утворення руйнівних явищ. За допомогою динамічної моделі трансформації мікросейсмічного сигналу можна розробити більш точні моделі для прогнозування геологічних явищ, таких як технічних землетруси, обрушень. При використанні геоінформаційних систем моніторингу збільшить безпеку ведення гірничих робіт.

Такий підхід має велике значення для наукових досліджень та практичного використання в геологічній та цивільній сфері.