



## МАТЕРІАЛИ

ІХ науково-практичної конференції  
молодих вчених України  
18 травня 2023 року

# МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ, ЇХ ВИРОБНИЦТВО ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ В СУЧАСНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ



**МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ, ЇХ ВИРОБНИЦТВО ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ В СУЧАСНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ:** матеріали ІХ науково-практичної конференції молодих вчених України (18 травня 2023 року). Київ, ФТІМС НАН України – 67 стор.

У збірнику представлено матеріали, які висвітлюють актуальні знання, практичний досвід і стратегічні бачення створення та виробництва інноваційної продукції на основі металевих матеріалів в контексті розвитку сучасної української промисловості: новітні конструкційні та функціональні металеві матеріали, нові ефективні технології одержання металевих матеріалів та виробів з них, аналітичні огляди іноземного досвіду створення інноваційних виробництв, існуючий досвід і нові пропозиції впровадження інноваційних технологічних рішень для ефективного розвитку української промисловості.

*Відповідальність за достовірність інформації, що викладена в матеріалах конференції, несуть їх автори.*

<https://doi.org/10.15407/ptima-mmpp-2023>

**METALLIC MATERIALS, THEIR PRODUCTION AND PROSPECTS OF APPLICATION IN MODERN INDUSTRY:** Proceeding of IX scientific and practical conference of young scientists of Ukraine (May 18, 2023). Kyiv, PTIMA of the NAS of Ukraine - 67.

The collection presents materials that highlight current knowledge, practical experience and strategic visions of the creation and production of innovative products based on metal materials in the context of the development of modern Ukrainian industry: the latest structural and functional metal materials, new effective technologies for obtaining metal materials and products from them, analytical reviews of foreign experience in creating innovative industries, existing experience and new proposals for the implementation of innovative technological solutions for the effective development of Ukrainian industry.

*The authors are responsible for the accuracy of the information presented in the conference proceeding.*

## ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

- Владимирський І.А.** – д.ф.-м. н., директор НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, Київ;
- Ворон М.М.** – к.т.н, заст. зав. відділу, ФТІМС НАН України, Київ;
- Гнилоскуренко С. В.** – к.т.н., старш. дослідник, зав. відділом ФТІМС НАН України, вчений секретар Асоціації ливарників України, Київ;
- Іванов В.Г.** – д.т.н., зав. кафедри МОЛВ, НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя;
- Калюжний П.Б.** – к.т.н, заступник директора з наукової роботи ФТІМС НАН України, Київ;
- Пархомчук Ж.В.** – к.т.н, старш. наук. співроб., ФТІМС НАН України, Київ;
- Семенко А.Ю.** – к.т.н, старш. наук. співроб., ФТІМС НАН України, Київ;
- Тимошенко А.М.** – к.т.н, старш. наук. співроб., ФТІМС НАН України, Київ;
- Турчанін М.А.** – д.х.н., проф., проректор з наукової роботи, ДДМА, м. Краматорськ;
- Шваб С.Л.** - к.т.н, старш. наук. співроб., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, асоційований член РМВ НАН України, Київ;
- Ямшинський М.М.** – д.т.н., проф., зав. кафедри ЛВ ІМЗ ім. Є.О. Патона «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, Київ.

## ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

- Калюжний П.Б.** – голова Оргкомітету, к.т.н, Голова Ради наукової молоді ФТІМС НАН України, Київ;
- Ворон М.М.** – член Оргкомітету, к.т.н, член Ради наукової молоді ФТІМС НАН України, Київ;
- Нейма О.В.** – член Оргкомітету, член Ради наукової молоді ФТІМС НАН України, Київ.

## ЗМІСТ

<b>Вейс В. І., Пархомчук Ж. В., Кондратюк С. Є.</b> ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ГРАДІЄНТНИХ СТРУКТУР У СТАЛЕВИХ ВИЛИВКАХ.....	5
<b>Водоп'янова Г. О., Турчанін М. А., Агравал П. Г.</b> ВИКОРИСТАННЯ CALPHAD-МЕТОДУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ ОБЛАСТЕЙ АМОРФІЗАЦІЇ РІДКИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Cu–Ni–Ti–Hf.....	8
<b>Ворон М. М., Chat GPT</b> СТРАТЕГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ.....	13
<b>М.О. Гнатенко</b> ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ З ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ.....	17
<b>Даниляк М.-О. М., Різун Ю. Я.</b> ІНГІБУВАЛЬНА ДІЯ ПРИРОДНЬОГО ПОЛІСАХАРИДУ – ГУМІАРАБІКУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.....	19
<b>Калюжний П. Б.</b> СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	23
<b>Kvasnytska K. H.</b> METHODS OF IMPROVING THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING COMPLEX-PROFILE PARTS BASED ON MELTED MODELS.....	27
<b>Кедровський С. М., Коваль Ю. М., Сліпченко В. М., Сліпченко Вяч. М.</b> НОВІ ПРИЙОМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІМПЛАНТІВ З ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	30
<b>Кирилюк С. Ф., Кирилюк Є. С.</b> ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ СИНТЕЗОВАНИХ АЛЮМОМАТРИЧНИХ КОМПЗИТІВ.....	32
<b>Лаврись С. М., Шляхетка Х. С., Даниляк О.-М. М.</b> КОРОЗІЙНА ПОВЕДІНКА АДИТИВНО ВИГОТОВЛЕНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ У ХЛОРИДНІЙ КИСЛОТІ.....	35

<b>Ліхацький Р. Ф.</b> ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЛЕГОВАНИХ ХРОМ-ЦИРКОНІЄВИХ БРОНЗ В ЯКОСТІ КОНТАКТНИХ ПАР ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....	38
<b>Маначин І. О., Шевченко А. П., Кисляков В. Г., Двоскін Б. В.</b> МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПІДГОТОВКИ ТА ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ РІДКОГО ЧАВУНУ МАГНІЄМ ДЛЯ КОНВЕРТЕРНОГО ПЕРЕДІЛУ.....	42
<b>Могилко В. В., Бурмак А. П., Волошко С. М., Франчік Н. В.</b> МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СПЛАВУ ВТ6 МЕХАНІЧНИМИ ВИСОКОЧАСТОТНИМИ УДАРАМИ.....	44
<b>Нейма О. В.</b> ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ЛИВАРНИХ ФОРМ.....	49
<b>Семенко А. Ю., Гойда Д. І.</b> ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ.....	52
<b>Сидорчук О. М., Євич Я. І., Мисливченко О. М., Миронюк Д. В., Миронюк Л. А.</b> СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ ДЛЯ ГАРЯЧОГО ДЕФОРМУВАННЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ.....	55
<b>Тимошенко А. М., Шматко О. В.</b> ІННОВАЦІЙНИЙ МЕТОД ОДЕРЖАННЯ ЛИТИХ ТРИШАРОВИХ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ДІЇ ВИСОКОЧАСТИТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	58
<b>Фон Прусс М. А.</b> СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЇ В УКРАЇНІ ПІД ЧАС ПОВНОМАСШТАБНОГО ВТОРГНЕННЯ російської федерації.....	60
<b>Шваб С. Л.</b> ПЕРСПЕКТИВИ УКРАЇНСЬКОГО ТИТАНУ ДЛЯ ВІТЧИЗНЯНОЇ ТА СВІТОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	63
<b>Янголь О. А.</b> ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО 3D-ПРИНТИНГУ ТИТАНОВИХ ЗАГОТОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ БАЗОВОГО МАТЕРІАЛУ, ОТРИМАНОГО ШЛЯХОМ ГІДРУВАННЯ-ДЕГІДРУВАННЯ	64

## ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ГРАДІЄНТНИХ СТРУКТУР У СТАЛЕВИХ ВИЛИВКАХ

**ВЕЙС В. І.**, молодший науковий співробітник,

[valentynveis@gmail.com](mailto:valentynveis@gmail.com)

**ПАРХОМЧУК Ж. В.**, к. т. н., старший науковий співробітник,

[zhanna\\_parkhomchuk@ukr.net](mailto:zhanna_parkhomchuk@ukr.net)

**КОНДРАТЮК С. Є.**, д. т. н., професор, провідний науковий дослідник,

[stkondrat@gmail.com](mailto:stkondrat@gmail.com)

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ*

При виробництві литої машинобудівної продукції у виливках сталей спостерігається формування макроструктурних зон різної морфології, дисперсності і протяжності по мірі віддалення від поверхні литого виробу.

Не зважаючи на те, що зазвичай намагаються забезпечити формування однорідної дрібнокристалічної будови по всьому об'єму виливків, подібно до виробів з прокату сталей, в ряді випадків стає доцільним створення у виливках диференційованих (градієнтних структур) для підвищення спеціальних властивостей і ресурсу роботи литих виробів. Градієнтність структури виливків і її зміни, залежно від термодинамічних умов кристалізації, зумовлює відповідні зміни механічних властивостей у різних перерізах виливків, відкриває нові можливості щодо інженерії структури і властивостей литих виробів та підвищення конкурентної спроможності ливарних технологій у машинобудуванні [1-5].

Виходячи з відсутності системних досліджень у цьому напрямі, метою даної роботи було встановлення закономірностей формування основних макроструктурних зон по перерізу виливків вуглецевих доєвтектоїдних сталей і кількісних змін їх протяжності залежно від термодинамічних умов кристалізації.

Дослідження проведені на прямокутних виливках сталей 20Л, 45Л і У7Л (масова частка вуглецю 0,21 %, 0,46 %, 0,69 % відповідно) розміром 115 × 130 × 200 мм, масою понад 25 кг із забезпеченням при їх кристалізації одностороннього переважачого охолодження торцевої частини виливків з різною інтенсивністю тепловідбору – 5 °С/с (піщана форма), 60 °С/с (чавунний кокіль), 300 °С/с (мідний водоохолоджуваний кокіль). Сталі плавилі в індукційній печі з кислим тиглем з

використанням однакових технічно чистих шихтових матеріалів. Розливу сталей здійснювали від стандартних температур ( $T_L+50^\circ\text{C}$ ). Виливки досліджуваних сталей вилучали з форм після їх охолодження до кімнатної температури.

При виборі сталей для експериментальних виливків виходили з необхідності дослідити вплив на процеси структуроутворення не тільки умов тепловідбору, але й температурного інтервалу кристалізації сталей в широкому діапазоні його змін.

Дослідження проводились на темплетях з центральної повздожньої частини виливків, що кристалізувались в умовах спрямованого одностороннього тепловідбору.

Одержані експериментальні результати свідчать про закономірні зміни морфології і протяжності макроструктурних зон виливків залежно від визначальних параметрів кристалізації – інтенсивності охолодження і температурного інтервалу твердо-рідкого стану розплаву.

Максимальні значення протяжності зони транскристалізації і зони розгалужених дендритів спостерігаються в сталі з низьким вмістом вуглецю (0,21 %) і найменшим температурним інтервалом кристалізації ( $40^\circ\text{C}$ ) при твердненні за умов швидкісного охолодження розплаву ( $300^\circ\text{C}/\text{c}$ ). При кристалізації з низькою швидкістю охолодження розплаву ( $5^\circ\text{C}/\text{c}$ ) найбільшого розвитку набувають зони розгалужених кристалів у виливках сталі 20Л і великих рівноосних кристалів в сталі У7Л відповідно з вузьким ( $40^\circ\text{C}$ ) і широким ( $115^\circ\text{C}$ ) інтервалом кристалізації.

Засобами регресійного аналізу результатів експериментів встановлено закономірності впливу досліджуваних термодинамічних параметрів на градієнтність структури по перерізу виливків сталей. Показано, що збільшення протяжності зони транскристалізації пов'язано з визначальним впливом підвищення швидкості охолодження розплаву, а розширення інтервалу температур кристалізації сталі зумовлює при цьому закономірне скорочення цієї зони у виливках.

Зона розгалужених дендритних кристалів набуває найбільшої протяжності за умов повільного охолодження розплаву в сталях з вузьким температурним інтервалом кристалізації. Розширення у високовуглецевих сталях інтервалу

кристалізації зумовлює суттєве скорочення протяжності цієї зони і послаблення впливу на неї швидкості охолодження.

Формування зони великих рівноосних кристалів пов'язано з визначальним впливом на її протяжність температурного інтервалу кристалізації сталей за всіх досліджуваних режимів охолодження розплаву при твердненні виливків. Розширення інтервалу кристалізації у наведеному діапазоні його змін (40-115 °С) призводить до суттєвого збільшення цієї макроструктурної зони в центральних об'ємах виливків вуглецевих сталей.

Одержані результати досліджень щодо впливу термодинамічних параметрів на процеси кристалізації та формування градієнтних структур у сталевих виливках відкривають нові можливості прогнозування і цілеспрямованого впливу на структуроутворення і механічні властивості литих сталевих виливків.

#### Список літератури:

- [1] Коваленко В.В., Блинова Е.И., Глезер А.М. и др. Формирование градиентных структур в сплавах Fe-Ni, полученных закалкой из жидкого состояния // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1983. – № 8. – С. 63 – 65.
- [2] Бачмутов В.П., Захаров И.Н. Моделирование градиентных структурных состояний в стальном слитке в ходе застывания // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2003. – № 8. – С. 28 – 33.
- [3] Кириевский Б.А., Трубаченко Л.Н., Александрова Е.А. Влияние направленной кристаллизации на структуру и износостойкость хромистых чугунов // Литейное производство. – 2020. – № 4. – С. 8 – 10.
- [4] Петров В.И., Сарычев В.Д., Лисицын К.А. и др. Формирование градиентных структур и термической обработке и в процессе эксплуатации рельсов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2002. – № 8. – С. 75 – 78.
- [5] Kondratyuk S.Ye., Veis V.I., Parkhomchuk Z.V. Structure formation and properties of overheated steel depending on thermokinetic parameters of crystallization // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2019. – Vol. 97 (2). – P. 49-56. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.8537>



## ВИКОРИСТАННЯ CALPHAD-МЕТОДУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ ОБЛАСТЕЙ АМОРФІЗАЦІЇ РІДКИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Cu–Ni–Ti–Hf

**ВОДОП'ЯНОВА Г. О.**, канд. хім. наук, завідувачка аспірантурою,  
[annasolyanova.as@gmail.com](mailto:annasolyanova.as@gmail.com)

**ТУРЧАНІН М. А.**, д-р. хім. наук, проректор з наукової роботи, управління  
розвитком та міжнародних зв'язків

**АГРАВАЛ П. Г.**, д-р. хім. наук, завідувач кафедри технології та обладнання  
ливарного виробництва

*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ*

Останні десятиліття зростає інтерес промисловості до виробів з аморфних сплавів, які можуть бути одержані різними методами з розплавів у вигляді тонких стрічок, лусочок, ниток або порошків при швидкостях охолодження  $10^5 \dots 10^6$  К/с або об'ємних деталей товщиною від декількох міліметрів до декількох десятків міліметрів при менших швидкостях охолодження. При цьому, з моменту відкриття аморфних сплавів, основний акцент був зроблений на визначення точкових складів в багатокомпонентних системах. Разом з тим, методики визначення нових аморфоутворюючих систем і концентраційних областей аморфізації розплавів в них потребують на подальшу розробку.

Для вирішення цієї задачі ефективним є термодинамічний підхід, в рамках якого концентраційна область аморфізації розплавів системи може бути прогнозована на основі зіставлення термодинамічної стабільності переохолодженої рідини і конкуруючих кристалічних фаз. При такому підході аморфний сплав розглядається як переохолоджена до температури склування рідина, що знаходиться в метастабільному стані. За умов придушення кристалізації проміжних фаз при швидкому охолодженні розплавів концентраційні області аморфізації можуть бути визначені шляхом розрахунків концентраційних границь метастабільних фазових перетворень між переохолодженими розплавами та граничними твердими розчинами на основі компонентів системи. В результаті подібних розрахунків для аморфоутворюючих систем можуть бути визначені області відносної термодинамічної стабільності переохолоджених розплавів. Концентраційна область одержання об'ємних

аморфних сплавів визначається відносним положенням метастабільних ліній ліквідуса при температурі аморфізації, а концентраційна область одержання швидкозагартованих аморфних сплавів може бути визначена по відносному положенню ліній  $T_0^{(L/\varphi)}$  рівності енергії Гіббса розплаву L і граничного твердого розчину  $\varphi$  [1].

Як було показано на прикладі розрахунків концентраційних областей аморфізації розплавів дво-, три- і багатокомпонентних систем [1], для рішення цієї задачі може бути застосований CALPHAD-метод [2] у поєднанні з адекватним описом термодинамічних властивостей аморфоутворюючих розплавів, який може бути наданий, наприклад, в рамках феноменологічної моделі асоційованого розчину [3].

Для системи Cu–Ni–Ti–Hf нами була розроблена база даних параметрів моделей термодинамічних властивостей рідких та твердих розчинів для розрахунку діаграм метастабільних фазових перетворень за участю переохолоджених розплавів системи Cu–Ni–Ti–Hf [1]. Ця база даних містить в собі параметри моделей температурно-концентраційної залежності енергії Гіббса розплавів і твердих розчинів на основі чистих компонентів для граничних дво- і трикомпонентних систем. Приклад розрахунку діаграм метастабільних фазових перетворень для розрізів  $x_{Ti}/x_{Hf} = 8/2$  і  $x_{Ti}/x_{Hf} = 2/8$  системи Cu–Ti–Hf представлений на рисунку 1, з якого видно, що для переохолоджених трикомпонентних розплавів спостерігаються концентраційні області відносної термодинамічної стабільності в порівнянні з твердими розчинами на основі чистих компонентів. На рисунку штрихами також показані лінії  $T_0^{L/(OЦК)}$ , де OЦК це ( $\beta Ti$ ) і ( $\beta Hf$ ). Результати подібних розрахунків, узагальнені на концентраційному трикутнику системи Cu–Ti–Hf, представлені на рисунку 2. Видно, що прогнозовані концентраційні області задовільно узгоджуються з відомими з літератури складами швидкозагартованих і об'ємних двокомпонентних і трикомпонентних аморфних сплавів. При цьому, відповідно до результатів прогнозу, можна очікувати їх отримання в значно ширших концентраційних областях, ніж відомо з літератури.

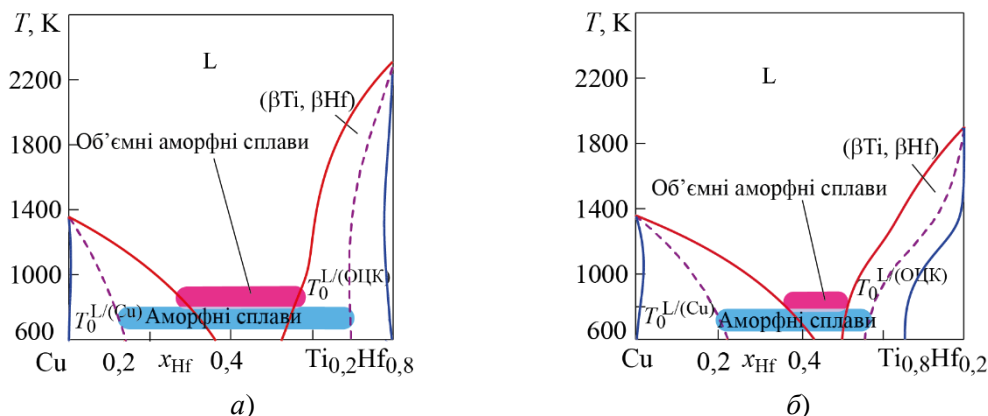


Рисунок 1. Політермічні розрізи  $x_{Ti}/x_{Hf} = 2/8$  (а),  $x_{Ti}/x_{Hf} = 8/2$  (б) діаграми метастабільних станів системи  $Cu-Ti-Hf$  і прогнозовані концентраційні інтервали утворення швидкозагартованих та об'ємних аморфних сплавів

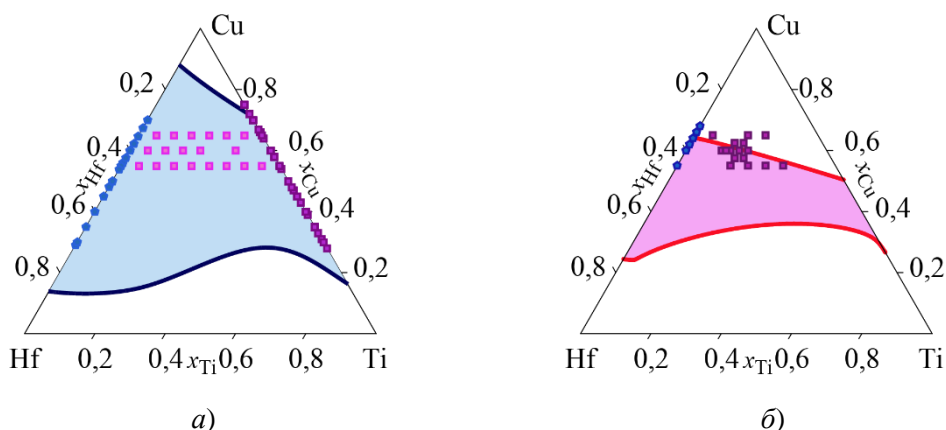


Рисунок 2. Прогнозовані концентраційні області отримання швидкозагартованих (а) та об'ємних (б) аморфних сплавів в системі  $Cu-Ti-Hf$  і експериментально встановлені склади аморфних сплавів (показані символами)

Результати подібних розрахунків для кожної з трикомпонентних систем, що обмежують систему  $Cu-Ni-Ti-Hf$ , узагальнені на рисунках 3 а, б, з яких видно що прогнозовані області задовільно узгоджуються зі складами аморфних сплавів в трикомпонентних системах  $Cu-Ni-Ti$  і  $Cu-Ni-Hf$ , для яких явище аморфізації досліджено найбільш детально. Для найменш дослідженої системи  $Ni-Ti-Hf$ , ґрунтуючись на прогнозі, можна очікувати отримання аморфних сплавів швидким загартуванням в концентраційній області  $0,15 < x_{Ni} < 0,90$ , а об'ємних аморфних сплавів – в області складів  $0,4 < x_{Ni} < 0,76$ .

Розроблена база даних була використана для розрахунку діаграм метастабільних фазових перетворень і прогнозування концентраційних інтервалів аморфізації в системі Cu–Ni–Ti–Hf. На рисунках 3 в, г, показано, як прогнозовані області аморфізації розташовується в концентраційному тетраедрі.

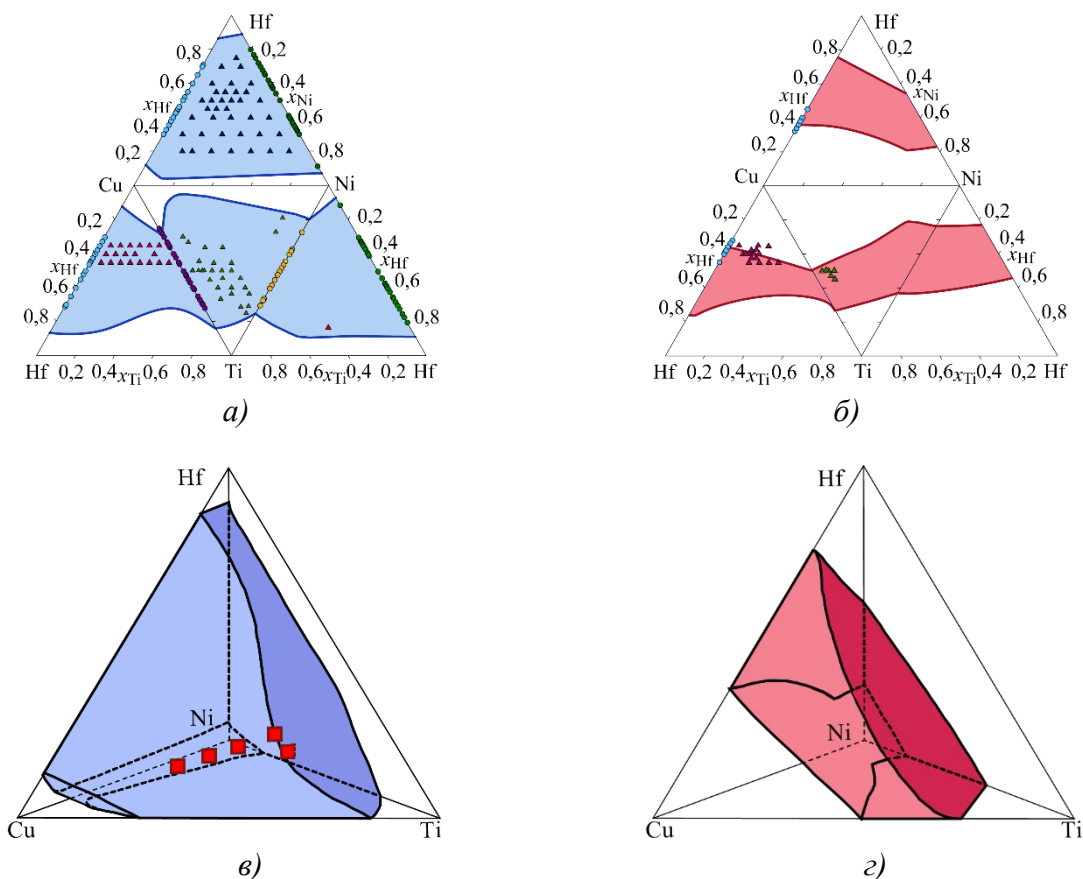


Рисунок 3. Прогнозовані концентраційні області аморфізації і експериментальні склади швидкозагартованих (а, в) і об'ємних (б, г) дво-, три- і чотирикомпонентних аморфних сплавів системи Cu–Ni–Ti–Hf

Результати прогнозування задовільно узгоджуються з експериментальними складами чотирикомпонентних швидкозагартованих аморфних сплавів, які були отримані в [4] і показані на рисунку 3, в квадратними символами. На сьогоднішній день інформація про одержання об'ємних аморфних сплавів системи Cu–Ni–Ti–Hf в літературі відсутня. Згідно з результатами прогнозу (рисунок 3, г) їх утворення можна очікувати в широкій концентраційній області.

### Висновки

1. На основі узагальнення результатів термодинамічних описів двокомпонентних систем Cu–(Ni, Ti, Hf), Ni–(Ti, Hf), Ti–Hf та трикомпонентних систем Cu–Ni–Ti, Cu–Ni–Hf, Cu–Ti–Hf, Ni–Ti–Hf розроблена база даних, що описує термодинамічні властивості твердих розчинів на основі компонентів та рідких сплавів, для направленої пошуку складів аморфних сплавів в системі Cu–Ni–Ti–Hf.

2. В рамках CALPHAD-метода розраховані діаграми метастабільних фазових перетворень за участю три- та чотирикомпонентних переохолоджених розплавів системи Cu–Ni–Ti–Hf і показано, що переохолоджені рідкі сплави мають широкі концентраційні області стабільності по відношенню до ГЦК розчинів на основі міді і нікелю і ОЦК розчинів на основі титану і гафнію.

3. Прогнозовані концентраційні області аморфізації відповідають одночасному виконанню умов  $x_{\text{Hf}} + x_{\text{Ti}} > 0,2$  і  $x_{\text{Cu}} + x_{\text{Ni}} > 0,2$  для швидкозагартованих аморфних сплавів та  $x_{\text{Hf}} + x_{\text{Ti}} > 0,4$  і  $x_{\text{Cu}} + x_{\text{Ni}} > 0,4$  для об'ємних аморфних сплавів.

### Список літератури

- [1] Turchanin, M. A. Predicting the composition ranges of amorphization for multicomponent melts in the framework of the CALPHAD method. / M. Turchanin, P. G. Agraval, T. Ya. Velikanova, A. A. Vodopyanova / Powder Metallurgy and Metal Ceramics – 2018. – Vol. 57, №. 1 – 2. – P. 57–70.
- [2] Saunders, N. CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide / N. Saunders, A. P. Miodownik. – Oxford: Pergamon Press. – 1998. – P. 496.
- [3] Turchanin, A. A. Thermodynamics of undercooled liquid and amorphous binary metallic alloys / A. A. Turchanin, M. A. Turchanin, P. G. Agraval / J. Metastable Nanocryst. Mater. – 2001. – V. 10. – P. 481–486.
- [4] Meng, X. L. Cu content and annealing temperature dependence of martensitic transformation of  $\text{Ti}_{36}\text{Ni}_{49-x}\text{Hf}_{15}\text{Cu}_x$  melt spun ribbons / X. Meng, Y. Fu, W. Cai, Q. Li, L. Zhao // Intermetallics. – 2009. – Vol. 17, № 12. – P. 1078–1084.

## СТРАТЕГІЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

**ВОРОН М. М.** кандидат технічних наук, заст. зав. відділу процесів плавки та рафінування сплавів,  
[mihail.voron@gmail.com](mailto:mihail.voron@gmail.com)  
*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ*  
**СНАТ GPT**, штучний інтелект, *Open AI, Сан-Франциско*

Завдяки вступу України до Світової організації торгівлі (СОТ) в 2008 році та підписанню Угоди про асоціацію з ЄС в 2014 році, українська промисловість отримала нові можливості для залучення інвестицій та розвитку інноваційних технологій. Проте, на жаль, реалізація цих можливостей мала деякі обмеження через ряд проблем в українській економіці та промисловості. На разі ці проблеми багатократно підсилились через військові дії та руйнування промислових об'єктів, тому обставини вимагають відбудови і перебудови вітчизняної промисловості на новий лад, що передбачає високий рівень інновацій та конкурентоспроможності.

Стратегія розвитку інноваційної промисловості для України повинна враховувати три головні складові: торгові відносини, потреби ринків світу і сусідніх країн та національні потреби. Важливо розуміти, що впровадження інноваційних технологій та розвиток нових продуктів не повинні залежати виключно від зовнішньої попиту, а мають бути націлені також на задоволення внутрішніх потреб. Даний аспект є важливим з точки зору економічної вигоди та стратегічної незалежності окремих галузей виробництва.

Між тим, зовнішньоекономічний вектор є в разі більш прибутковим, тому Україна, як країна з потужним індустріальним потенціалом, повинна використовувати свої переваги для забезпечення економічного зростання та конкурентоспроможності на міжнародному ринку. Для досягнення цих цілей, необхідно розробити стратегію розвитку інноваційної промисловості, що враховуватиме торгові відносини, потреби ринків світу та сусідніх країн.

Одним з найважливіших аспектів розвитку інноваційної промисловості є залучення інвестицій. Для України це стає важливою задачею, оскільки інвестиції дозволять вивести виробництво на новий рівень та запровадити інноваційні технології. Для цього важливо розробити ефективні програми державної

підтримки для приваблення інвестицій в промисловість, зокрема для малих та середніх підприємств і розвивати співпрацю з країнами-партнерами для реалізації спільних проектів і взаємної підтримки.

Україна має потужний потенціал в багатьох сферах своєї діяльності, найбільш розвиненими та конкурентоспроможними серед яких є ІТ-індустрія, аграрна галузь та агропромисловість, енергетика, логістична галузь.

Найбільший промисловий потенціал в Україні історично належить хімічній та металургійній промисловості. Для відновлення і розвитку саме металургійної промисловості, з урахуванням особливостей існуючих галузей та кадрового потенціалу, найбільш вагомими стратегічними аспектами розвитку є:

1. Виробництво легких сплавів. Україна має великі запаси відповідної сировини і технології для виробництва алюмінію, титану та їх сплавів, які є важливими матеріалами для аерокосмічної промисловості і машинобудування.

2. Виробництво високоякісних сталей. Високоякісні сталі використовуються у багатьох галузях, включаючи будівництво, автомобільну промисловість та енергетику. Україна має досвід і технології для виробництва таких матеріалів та виробів з них. Особливо важливим у даному питанні є розвиток виробництва підшипників, трубних заготовок та інструментів.

3. Виробництво та переробка дорогоцінних металів. Розвиток виробництва та переробки цих металів може стати важливим джерелом економічного розвитку.

4. Виробництво та переробка матеріалів для вітрової та сонячної енергетики. Дане рішення слідує за світовими трендами і може бути вагомим як для забезпечення внутрішніх потреб, так і для зайняття експортних позицій.

5. Нарешті, розвиток нових матеріалів та технологій для створення відновлюваної енергії є ключовим фактором в забезпеченні сталого економічного розвитку. Взагалі, розвиток нових матеріалів та технологій може стати одним з ключових факторів у забезпеченні сталого економічного розвитку України.

Стратегія розвитку української інноваційної промисловості повинна базуватися на наступних принципах, щоб забезпечити максимальну економічну доцільність:

1. Розвиток галузей, які мають потенціал для високої доданої вартості та високих технологій, таких як інформаційні технології, біотехнології, машинобудування, енергетика, авіаційна та космічна промисловість, медична техніка, а також електроніка та пристрої широкого вжитку.

2. Створення інфраструктури, яка підтримує розвиток інноваційних підприємств, таких як технопарки, інкубатори та бізнес-акселератори. Це допоможе збільшити кількість інноваційних стартапів, які зможуть створювати нові робочі місця та зміцнювати економіку країни.

3. Підтримка наукових досліджень та розробок в університетах та дослідницьких інститутах, а також сприяння співпраці між галузевими підприємствами та науковцями. Це допоможе забезпечити наявність новітніх технологій та інноваційних рішень для розвитку промисловості.

4. Розвиток міжнародного співробітництва та партнерства зі світовими лідерами у галузі науки та технологій. Це дозволить Україні здобути доступ до найсучасніших технологій та інновацій, а також відкрити нові ринки для експорту продукції високої якості.

5. Введення підтримки держави для створення інноваційних стартапів, зокрема забезпечення доступу до фінансування та інвестицій.

6. Розвиток системи освіти та навчання в галузі інновацій та технологій, в тому числі залучення іноземних експертів та партнерів для обміну знаннями та практиками.

7. Встановлення міжнародних зв'язків та партнерств з іноземними компаніями та виконання аутсорсних робіт для них – як проектних і науково-дослідних, так і тих, які передбачають перенесення виробництв, або створення нових потужностей на території України.

Розвиток інноваційної промисловості потребує сприяння з боку держави шляхом зменшення бюрократичних перешкод, незалежності від традиціоналістично і консервативно орієнтованих органів управління. Крім того, важливо підвищити вимоги до кадрової відповідності менеджерів та працівників і сприяти підвищенню їх кваліфікації.

Для досягнення успіху в розвитку інноваційної промисловості необхідно встановити тісні зв'язки між наукою та виробництвом. Необхідно створити



сприятливі умови для співпраці між університетами, науковими установами та промисловими підприємствами і забезпечити відповідні рівні фінансування.

Науково-технічні розробки повинні комерціалізуватися та масштабуватися. Для підтримки та розвитку цих процесів необхідно забезпечити спрощення процедур реєстрації та ліцензування, зниження податкового тягаря та поліпшення правового регулювання в сфері інноваційної діяльності.

Загальна мета такої стратегії полягає в тому, щоб створити інноваційну економіку, яка буде базуватися на знаннях, високих технологіях та діловій активності. Це може допомогти зробити Україну однією з провідних країн у регіоні та забезпечити стабільне та стійке економічне зростання в майбутньому.

## ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ АВІАЦІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ З ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

**ГНАТЕНКО М. О.**, PhD, старший викладач кафедри «Машини і технології ливарного виробництва» [gnatenkomike66@gmail.com](mailto:gnatenkomike66@gmail.com)  
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Виконано отримання авіаційної деталі кільцевого типу з жароміцного конструкційного сплаву EI 868 (XH60BT) методом адитивного багат шарового плазмового наплавлення проволокою. Традиційною технологією отримання даного типу кільцевих заготовок є штампування прутків, котрі далі доводяться до кінцевої форми деталі шляхом подальшої механічної обробки. Недоліком традиційної технології є значні витрати металу, який в процесі механічної обробки пресованого прутка, фактично перетворюється в стружку і не використовується повторно, що призводить до підвищення вартості готового виробу. Застосування адитивних технологій дозволить значно скоротити витрати матеріалу при отриманні кільцевих заготовок за рахунок виготовлення заготовки з конфігурацією максимально наближеною до геометрії деталі.

Адитивне наплавлення проводилось на роботизованому комплексі, який складається з плазмового джерела живлення SBI PMI-350 AC/DC TL та робота FANUC M-710iC на жорстко закріплену підкладку зі сталі 20.

Для визначення можливості отримання авіаційних деталей методом пошарового плазмового наплавлення було проведено дослідження наплавленого матеріалу. Проведено дослідження структури вирощеної деталі, встановлено, що мікроструктура відповідає нормальному стану сплаву EI868 (XH60BT) в мікроструктурі лінії сплавляння не є видимими, структура є однорідною з взаємним проростанням зерен між шарами.

В ході визначення технологічних властивостей деталі, було встановлено, що значення механічних властивостей сплаву деталі отриманої методом адитивного вирощування знаходяться на рівні литих заготовок та поковок і при  $T=900^{\circ}\text{C}$  становлять:  $\sigma_b=35\pm 5$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2}=49\pm 5$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\psi = 62\pm 5$  %.

Після механічної обробки вирощеної заготовки проведено капілярний метод контролю та радіаційний контроль вирощеної деталі – тріщин та інших

видів критичних металургійних дефектів не виявлено. Практична значущість впровадження даного методу полягає у значному скороченні витрат матеріалу при отриманні деталі, та забезпеченні економічної ефективності яка складає близько 159 тисяч гривень.

#### **Список літератури:**

[1] Wang L., Suo Y., Liang Z., Wang D., Wang Q. Effect of titanium powder on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Al–Mg alloy. *Materials Letters*. 2019. Vol. 241. P. 231–234.

## ІНГІБУВАЛЬНА ДІЯ ПРИРОДНОГО ПОЛІСАХАРИДУ – ГУМІАРАБІКУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

ДАНИЛЯК М.-О. М., канд. хім. наук, науковий співробітник,

[danyliak-olena@ukr.net](mailto:danyliak-olena@ukr.net)

РІЗУН Ю. Я., молодший науковий співробітник

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів*

### Вступ

Алюмінієві сплави зазвичай використовують як конструкційні матеріали у різних галузях промисловості через їх високі механічні властивості [1]. Вони містять різні легуючі елементи, такі як мідь, марганець, кремній, магній, цинк, які утворюють інтерметаліди, що зумовлює погіршення корозійної тривкості сплавів. Інтерметаліди забезпечують міцність та твердість, але підвищують чутливість сплавів до корозії через різницю потенціалів легуючих компонентів та алюмінієвої матриці [2]. Катодні процеси переважно відбуватимуться у фазі, що має вищий електрохімічний потенціал (як правило інтерметаліди), тоді як інша фаза з меншим потенціалом підтримуватиме анодний процес [3].

Плівка оксиду алюмінію є тонкою та дефектною на інтерметалідах, внаслідок чого підвищується локальна сприйнятливність до корозії [4]. Для захисту металевих виробів, продовження терміну їх експлуатації та збереження навколишнього середовища перспективним напрямком є розробка та застосування екологічно безпечних інгібіторів корозії [5]. Тому метою даної роботи є дослідження корозійної тривкості алюмінієвого сплаву Д16Т у середовищі натрій хлориду з додаванням екологічно безпечного полісахариду – гуміарабіку як інгібітора корозії.

### Матеріали та методи досліджень

Корозійну тривкість алюмінієвого сплаву Д16Т досліджували методом потенціодинамічної поляризації в 0,1% розчині NaCl із додаванням гуміарабіку (0,5...2,5 g/l), використовуючи потенціостат MТech COR-500, електрод порівняння Ag/AgCl та допоміжний платиновий. Швидкість сканування потенціалу 2 mV/s. Робоча площа зразка 1 cm<sup>2</sup>.

Морфологію поверхні та елементний склад алюмінієвого сплаву після витримки в досліджуваних розчинах вивчали на сканівному електронному мікроскопі Zeiss EVO-40XVP зі системою мікроаналізу INCA Energy 350.

### Результати досліджень та їх обговорення

На рис. 1 наведено поляризаційні криві алюмінієвого сплаву Д16Т після 24 h експозиції у 0,1% розчині NaCl з різною концентрацією гуміарабіку. Потенціал та струм корозії сплаву Д16Т у 0,1% розчині NaCl після 3 h експозиції становить -0,53 V та  $8,7 \cdot 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$  відповідно. При додаванні гуміарабіка значення струмів зменшуються і при концентрації 2 g/l струм корозії найнижчий, в ~2 рази менший відносно неінгібованого розчину (табл. 1). При наступному збільшенні концентрації до 2,5 g/l струми корозії зростають. Це може бути пов'язано з тим що, внаслідок розчинення пасивного шару гуміарабік десорбується разом з ним через розчинні комплекси Al-гуміарабік. При збільшенні тривалості експозиції захисна дія інгібітора зберігається при концентрації 2 g/l.

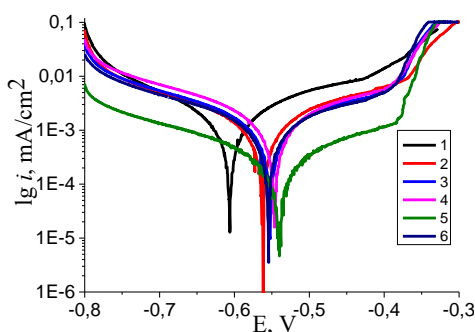


Рис. 1. Поляризаційні криві алюмінієвого сплаву Д16Т після 24 h експозиції у 0,1% розчині NaCl з різною концентрацією гуміарабіку: 1 – 0; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 1,5; 5 – 2; 6 – 2,5 г/л

Таблиця 1. Електрохімічні характеристики алюмінієвого сплаву Д16Т після експозиції у 0,1% розчині NaCl з різною концентрацією гуміарабіку

Експозиція C, g/l	3 h		24 h	
	$E_{\text{cor}}$ , V	$i_{\text{cor}} \cdot 10^4$ , mA/cm <sup>2</sup>	$E_{\text{cor}}$ , V	$i_{\text{cor}} \cdot 10^4$ , mA/cm <sup>2</sup>
0	-0,53	8,7	-0,61	9,1
0,5	-0,54	5,36	-0,56	7,8
1	-0,52	4,64	-0,55	7,6
1,5	-0,53	4,52	-0,55	7,5
2	-0,51	5,06	-0,54	2,2
2,5	-0,53	5,49	-0,55	7,1

Поверхню алюмінієвого сплаву Д16Т досліджено методом скануючої електронної мікроскопії та визначено її хімічний склад за допомогою EDX-аналізу після 24 h експозиції у 0,1% розчині NaCl, а також з додаванням гуміарабіку до агресивного середовища (рис. 2, табл. 2). Поверхня сплаву Д16Т, внаслідок експозиції в неінгібованому середовищі є неоднорідною та вкрита гідроксидно-оксидними шарами. У випадку експозиції у 0,1% розчині NaCl інгібованому гуміарабіком на алюмінієвому сплаві утворюється більш однорідна захисна плівка, в якій присутній вуглець та кисень. Наявність цих елементів на поверхні може свідчити про адсорбцію молекул гуміарабіку як на алюмінієвій матриці, так і в околі інтерметалідів.

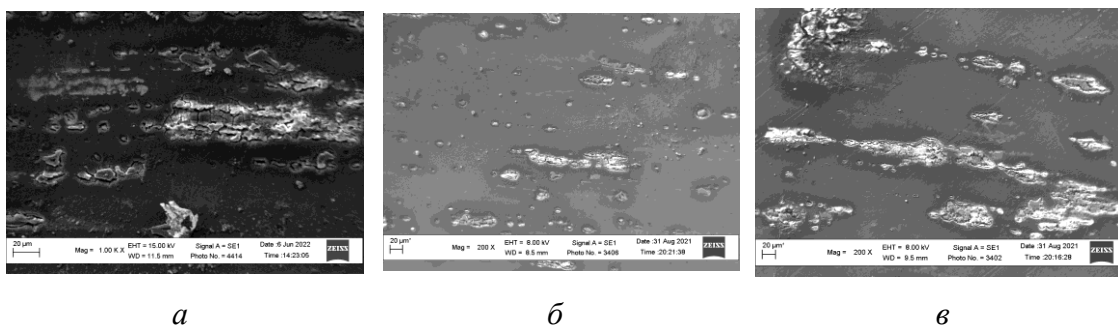


Рис. 2. СЕМ-зображення поверхні алюмінієвого сплаву Д16Т після 24 h експозиції у 0,1% розчині NaCl: а – неінгібованому; з додаванням гуміарабіку: б – 1; в – 2 g/l

Таблиця 2. Хімічний склад (у мас. %) поверхні алюмінієвого сплаву Д16Т після 24 h експозиції у 0,1% розчині NaCl з різною концентрацією гуміарабіку

Елемент	C, g/l		
	0	1	2
C	-	11.35	17.70
O	29.27	11.70	10.48
Mg	1.01	1.27	1.19
Al	64.80	69.93	65.87
Mn	0.43	0.50	0.49
Fe	0.33	0.50	0.41
Cu	3.59	4.76	3.86
Cl	0.57	-	-

Крім цього, на поверхні не виявлено слідів хлору, що вказує на бар'єрні властивості сформованої гуміарабіком захисної плівки. Як видно з рис 2 б, в околі інтерметалідів можливе утворення більш товстішої плівки, що може бути зумовлено формуванням металокомплексів алюміній-молекули гуміарабіку. Вказані комплекси ймовірно пригнічують корозійні процеси біля катодних включень.

### **Висновки**

Корозійна тривкість алюмінієвого сплаву Д16Т в 0,1% розчині NaCl підвищується через інгібувальну дію гуміарабіку за його концентрації 2 г/л, внаслідок формування на поверхні захисної плівки з бар'єрними властивостями.

Отримані результати досліджень свідчать про перспективу використання полісахаридів, зокрема гуміарабіку для підвищення корозійної тривкості алюмінієвих сплавів та можливість його застосування у екологічно безпечних синергічних композиціях з протикорозійним ефектом.

### **Список літератури:**

- [1] Xue B., Zong X., Wang, C., Zhang H., Luo. J. Corrosion inhibition of a sol-gel coating modified with cobalt- enriched zeolite on AA2024-T3 aluminum alloy / *Int. J. Electrochem. Sci.* – 2019. – Vol. 14. – P. 10966–10982.
- [2] Gobara M., Baraka A., Akid R., Zorainy M. Corrosion protection mechanism of Ce<sup>4+</sup>/organic inhibitor for AA2024 in 3.5% NaCl / *RSC Advances.* – 2020. – Iss. 4. – P. 2227–2240.
- [3] Korniy S., Zin I., Tymus M., Khlopyk O., Holovchuk M. Steel Corrosion Inhibition by Microbial Polysaccharide and Tartrate Mixture / *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion.* – 2022. – Vol. 8. Iss. 1. –Article number 6.
- [4] Xhanari K., Finšgar M. Organic corrosion inhibitors for aluminum and its alloys in chloride and alkaline solutions / *A review Arabian Journal of Chemistry.* – Vol. 12. Iss. 8. – 2019. –P. 4646 – 4663.
- [5] Korniy S., Zin I., Khlopyk O., Tymus M., Holovchuk M. Influence of a Phosphate–Nitrate Composition on the Corrosion of Mechanically Activated Aluminum Alloy / *Materials Science.* – 2021. – Vol. 57. Iss. 2. – P. 284 –290.

## СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

**КАЛЮЖНИЙ П.Б.**, к.т.н., заст. директора з наукової роботи,  
[kpb.ptima@gmail.com](mailto:kpb.ptima@gmail.com)

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ*

Литі металеві вироби є невід'ємною частиною людського життя й економіки, оскільки вони присутні в 90% промислових товарів і обладнання, починаючи від побутової техніки до відповідальних деталей літаків і автомобілів. Метод лиття дозволяє виготовляти вироби складної геометрії та є дешевшим порівняно з іншими виробничими процесами при середній та великій серійності виробництва. Галузь ливарне виробництво об'єднує процеси, що пов'язані з одержанням литих виробів шляхом заливання розплавленого металу в ливарну форму.

Розвиток науки та технологій створює нові задачі та диктує нові умови для всіх галузей промисловості, в тому числі і ливарного виробництва. Тому актуальним питанням є аналіз та виявлення сучасних тенденцій розвитку ливарного виробництва. Наразі можна виділити п'ять основних тенденцій розвитку лиття металів [1].

1) **Витіснення сталі іншими матеріалами.** Сталь була основним матеріалом для більшості конструкцій і деталей, і так було десятиліттями. Однак через свою вагу сталь витісняється легшими альтернативами, такими як алюміній. Магній і титан також є чудовою альтернативою завдяки своїй міцності та невеликій густині. Причинами витіснення сталі є те, що автомобільна і авіакосмічна промисловість потребують легших деталей. Завдяки більш досконалим методам виробництва, що призводять до отримання чистих і високоякісних металевих сплавів, деякі з альтернатив підскочили до верхньої частини списку попиту, включаючи алюміній. У машинобудуванні алюміній використовується для виконання складних завдань. У 2017 році було вироблено приблизно на 6% більше алюмінію, ніж у 2016 році, а собівартість готової продукції знижується завдяки передовим технологіям виробництва [2]. Розроблені нові алюмінієві сплави та технології одержання виробів з них, які забезпечують



вищі показники механічних властивостей, що робить привабливими для використання їх в конструкціях автомобілів.

2) Протягом десятків років актуальною залишається **автоматизація виробничих процесів**. Щоб залишатися конкурентоспроможними, ливарні підприємства покладаються на напівавтоматичні або повністю автономні системи, щоб підтримувати (або збільшувати) свою продуктивність. Крім того більшість ливарних процесів є небезпечними, тому автоматизація та сучасне обладнання усувають небезпеку для працівників. Системи автоматизації можуть значно підвищити продуктивність, зберігаючи при цьому високий ступінь точності та якості виробів. Більше того, окрім несправності обладнання, апаратне забезпечення автоматизації ніколи не втомлюється та ніколи не перегорає, на відміну від людей, що працюють.

3) **Запровадження Індустрії 4.0.** Виробнича промисловість уже охопила інтелектуальні технології, впроваджуючи більш цифровізовані процеси в більшому поштовху до Індустрії 4.0. Її характерними рисами є повністю автоматизовані виробництва, на яких керівництво всіма процесами здійснюється в режимі реального часу і з урахуванням мінливих зовнішніх умов. Кіберфізичні системи створюють віртуальні копії об'єктів фізичного світу, контролюють фізичні процеси з використанням розумних датчиків, що підключені до обладнання, і приймають децентралізовані рішення. Вони здатні об'єднуватися в одну мережу, самоналагоджуватися і самонавчатися, взаємодіяти в режимі реального часу, аналізувати масиви вхідної інформації, щоб миттєво приймати рішення.

Важливу роль відіграють інтернет-технології - Internet of things, що забезпечують комунікації між персоналом й обладнанням. Пристрої та датчики Інтернету речей можна інтегрувати в обладнання для виробництва металу, щоб надавати дані в реальному часі та здійснювати моніторинг продуктивності та використання обладнання. Потім ці дані можна проаналізувати для оптимізації експлуатації та обслуговування обладнання, що призведе до підвищення ефективності та економії коштів [3]. Крім того, обладнання з підтримкою Інтернету речей можна контролювати дистанційно. Інтеграція інтернет-технологій також забезпечує прогнозне технічне обслуговування, використовуючи дані з

машин і датчиків для прогнозування необхідності техобслуговування, скорочуючи час простою та збільшуючи термін служби обладнання.

4) **3D-технології (адитивні технології).** Технологія 3D-друку використовується для роботи з десятками різних матеріалів, включаючи метал. Адитивні технології створюють точні та високоякісні деталі та вироби. Виготовлення одиничних виробів, які є складними для виробництва за допомогою традиційних методів лиття, є простою справою для 3D-принтерів. З однієї сторони адитивні технології є конкуруючою технологією для лиття металу, особливо для невеликих проектів, незалежно від обсягу. З іншої сторони 3D-технології знайшли застосування в технологічному процесі виготовлення металевих деталей литтям. Вони застосовуються для виготовлення постійних чи разових ливарних моделей (з пластику, воску), іншого ливарного оснащення, піщаних стрижнів та ливарних форм. Очевидні переваги даних технологій проявляються при одержанні складнопрофільних деталей, у випадку виготовлення яких традиційними методами необхідно було б застосувати велику кількість стрижнів та ливарного оснащення. Тенденція до збільшення застосування 3D-технологій в ливарному виробництві буде збільшуватися.

5) **Підвищення екологічності процесів.** Ні для кого не секрет, що ливарні цехи та виробничі підприємства складають одні з найбільш енерговитратних операцій у комерційному світі. Якщо нічого не зміниться, промисловість стане ще більш шкідливою для навколишнього середовища та продовжить викидати шкідливі парникові гази. Більшість галузей промисловості вже запровадили екологічно чисті та зелені ініціативи. Можливий перехід до відновлюваних джерел енергії, покращеного виробництва та поводження з відходами та більш ефективних операцій. Останнє особливо доступно, якщо лише застосувати більш ефективні ливарні форми та технології, щоб зменшити потреби в енергії та скоротити використання сировини. Для прикладу, найбільш екологічним вважається лиття в піщано-глинисті форми через застосування в якості сполучної речовини бентоніту. Однак дана технологія також має проблеми, основною з яких є втрата бентоніту та вуглецю разом з пилом. Запропоновані [4] технології та обладнання, що дозволяють відновити до 83% бентоніту та вуглецю з пилу, які за вартістю є в двічі дешевшими за свіжі матеріали. Таке використання

перероблених матеріалів є одним з прикладів ресурсоефективності, якій мають відповідати всі сучасні виробничі процеси.

Автоматизація, більш ефективні матеріали, інтелектуальні технології, адитивне виробництво та екологічні вимоги – це лише деякі з тенденцій, які формують майбутнє лиття металів. Важливо також усвідомлювати, що, хоча ці тенденції зараз є найбільш актуальними, ринок динамічний, і попереду буде багато інших. Перш за все, гнучкість є, мабуть, однією з найважливіших вимог до операцій з лиття металу, хоча б лише для того, щоб йти в ногу зі змінами часу.

### Список літератури:

- [1] 6 Influential Trends Shaping the Future of the Metal Casting Industry. – Режим доступу: <https://www.industry-era.com/6-Influential-Trends-Shaping-the-Future-of-the-Metal-Casting-Industry-by-Megan-R-Nichols-Freelance-Technical-Writer.php>
- [2] Tracking Trends for Metalcasting. – Режим доступу: <https://www.foundrymag.com/issues-and-ideas/article/21931980/tracking-trends-for-metalcasting>
- [3] What Metal Casting Trends Influence the Market? – Режим доступу: <https://thebossmagazine.com/what-metal-casting-trends-influence-the-market/>
- [4] A New Look at Recycling Green Sand Wastes. – Режим доступу: <https://www.foundrymag.com/molds-cores/article/21125856/new-look-at-recycling-green-sand-imerys-high-temperature-solutions>

## METHODS OF IMPROVING THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING COMPLEX-PROFILE PARTS BASED ON MELTED MODELS

**KVASNYTSKA K. H.**, PHD student of Physics-chemistry of casting processes Dep.,  
[katonish@gmail.com](mailto:katonish@gmail.com)  
*Physico-technological institute of metals and alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv*

As the Ukrainian gas turbine industry advances, there is a growing need to improve the designs of gas turbines and installations, resulting in more complex blade designs. This increase in complexity has led to a significant rise in labor intensity during the production of castings [1]. To address this challenge, it is necessary to enhance the efficiency of the casting process while simultaneously improving the quality of the castings. While there has been extensive research on developing new alloy compositions for gas turbine blade casting, little attention has been paid to the importance of ceramic casting molds. These molds significantly impact the formation of properties, geometry, and quality of the final cast blades [2-3].

The manufacturing of highly loaded elements for GTE (Gas Turbine Engine) that have complex geometries is challenging. It is essential to maintain control over a significant number of critical forming surfaces while ensuring that surface roughness does not exceed  $1.25\ \mu\text{m}$ . It is also crucial to ensure that the geometric parameters of the part's surfaces are accurate within 5-7 qualities. To achieve the desired quality, it is necessary to use a ceramic mold that meets certain requirements. These requirements include chemical inertness to the model mass and metal, strength to withstand static and dynamic pressures of the melt without deformation, and susceptibility to the alloy's shrinkage. Additionally, the mold must guarantee proper surface roughness and high accuracy of the finished product's size [4].

Despite the vast experience of turbo-building enterprises in Ukraine, there is a significant shortage of blade castings, which can sometimes reach 60%. The primary cause of this issue is the high percentage of defects, which can be as high as 40%. These defects include heterogeneity, thermal cracks, and gouging of the rods. They occur during the stage of obtaining ceramic forms due to imperfections in the model masses, molding, and rod materials used. These production losses result in significant financial

losses for enterprises. Therefore, reducing shortages is an urgent task, and measures must be taken to address this issue [5].

To produce cooled GTE blades from heat-resistant nickel-based alloys through casting according to melting models, ceramic rods based on corundum and fused quartz are primarily used. To increase the yield of suitable castings, it is essential to ensure that the inner surfaces of the blades have minimal hydrodynamic resistance, that the process of removing ceramics does not introduce hydrogen, and that harmful components containing fluorine are excluded.

To develop or improve gas turbine designs, experimental batches of blades must be produced. However, this process can take up to 6 months to a year due to the lengthy equipment manufacturing process. One effective solution to this problem is the use of additive technologies to produce one-off blade models. Another relevant issue is the environmental friendliness of these processes. Currently, the manufacture of ceramic molds involves using ethyl silicate as a binder, which requires the use of organic explosive and fire-hazardous solvents such as ethyl alcohol and acetone [6].

The outcome of this research will be the proposal of environmentally friendly water-based binders for the production of ceramic forms. These binders will have similar technological characteristics to ethyl silicate binders. Additionally, new model mass compositions and technologies for the production of disposable working models and guide vanes of gas turbines will be developed. The study will also determine the use of polymer materials and technologies for additive manufacturing of one-off blade models, along with optimal modes of removing models from ceramic molds.

### References:

- [1] Khalatov A.A., Yushchenko K.A., Isakov B.V., Dashevskiy Y.Ya., Shevtsov A.P. Gas turbine construction in Ukraine: current state and prospects for development // Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine. - 2013. - No. 12. - P. 40-49.
- [2] Sapchenko I. G., Zhilin S. G., Shtern M. V. The accuracy of the removed models and the quality of shell molds in investment casting // Foundry production. - 2005. - No. 2. - S. 20–22.
- [3] Wahl J.B., Harris K. CMSX-4 plus single alloy development, characterization and application development // Superalloys 2016: Proc. Of the 13th International Symposium on Superalloys, TMS (the Minerals, Metals&Materials Society). – 2016.- P.25-33.
- [4] Repyakh S.I. Technological foundations of casting on molten models. – Dnipropetrovsk.: Lyra LTD. - 2006. – 1056 p.

- [5] Parshukova N.Yu. Improving the technological properties of ceramic molds in investment casting // Foundry production. - 2001. - No. 10. - S. 21-23.
- [6] Zamkovoі V.E. Improvement of the processes of forming the internal cavity of the cooled blades of the gas turbine engine. Autoref. thesis Ph.D. technical sciences - Kyiv. - 2005.

## НОВІ ПРИЙОМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ІМПЛАНТІВ З ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

**КЕДРОВСЬКИЙ С. М.**, к.ф.-м.н., н.с. відділу фізики фазових перетворень,  
[sergeyv88001@gmail.com](mailto:sergeyv88001@gmail.com)

**КОВАЛЬ Ю. М.**, д.т.н., професор, чл.-кор. НАНУ, зав. відділу фізики фазових перетворень

**СЛІПЧЕНКО В. М.**, к.т.н., н.с. відділу фізики фазових перетворень

**СЛІПЧЕНКО ВЯЧ. М.**, інж. відділу фізики фазових перетворень

*Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, м. Київ*

Розробка нових способів виготовлення конструкцій імплантів з функціональних матеріалів на основі нітінолу - актуальний напрям медичного матеріалознавства.

Типові елементи стентів та штучних серцевих клапанів, які наразі використовують в медицині та виготовляють методом лазерного різання тонкостінної трубки з нітінолу, є відносно жорсткими та негнучкими. Під час динамічних рухів серця, яке активно перекачує кров, механічні характеристики конструкції клапана можуть не відповідати таким динамічним рухам, що може спричинити травму поверхонь серця, розриви в самому каркасі, спричинити або посилити проблеми під час чи після імплантації.

Імпланти з мікроархітектурою повинні мати інші властивості (механічні та функціональні), ніж вироби з консолідованого матеріалу. Завдяки цьому факту можна використовувати не трьохмірні напівфабрикати конструкції, а заготовки у вигляді дроту. Це дає можливість отримати конструкції з параметрами, які нададуть виробам меншу собівартість та підвищені функціональні властивості. Що мається на увазі. Технології ливарного виготовлення складних мініатюрних конструкцій або трубки і її подальшого лазерного різання не тільки затратні та складні в реалізації, часто має місце зміна хімічного складу, яка, в свою чергу, змінює параметри функціональних властивостей (характеристичні температури фазового переходу). В той час, як функціональні властивості в конструкції, що виготовлена з дроту, весь час зберігаються, така архітектура має гнучкість відповідну до умов робочого середовища.

Таким чином, виготовлення імплантів методом плетіння дроту з нітінолу може забезпечити не тільки нижчу собівартість виробу, а і відповідну гнучкість, яка буде відповідати або іншим чином не перешкоджати динамічному руху оточуючого середовища живого організму.



## ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ СИНТЕЗОВАНИХ АЛЮМОМАТРИЧНИХ КОМПОЗИТІВ

**КИРИЛЮК С. Ф.**, мол. наук. співроб.,

[kyryliukstepan@gmail.com](mailto:kyryliukstepan@gmail.com)

**КИРИЛЮК Є. С.**, к. т. н., наук. співроб.,

[zkaraimcuk@gmail.com](mailto:zkaraimcuk@gmail.com)

*Інститут Проблем Матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ*

Перспективним, особливо для композитів на основі алюмінію системи Al-Ti-C, є напрямок пов'язаний з попереднім синтезом карбиду титану у порошковій суміші. В залежності від співвідношення вмісту титану і вуглецю в суміші при її нагріванні відбувається in-situ виділення дисперсних часток карбиду титану та тройного карбиду титану, що дозволяє керувати їх дисперсністю і формою та завдяки тому, що частинки порошку являють собою композит AlTi-TiC-Al<sub>2</sub>TiC/Al<sub>3</sub>TiC. Тож, карбід титану не взаємодіє з алюмінієвою матрицею, не утворюючи небажаних сполук. Авторами накопичено та систематизовано, в результаті попередніх досліджень [1-4], певний обсяг інформації щодо отримання нових композиційних матеріалів, технологій підготовки порошкових сумішей (механічні методи: розмел, хіміко-термічні методи: обробка в середовищі аргону та в вакуумі), умов консолідації (спікання в контрольованих газових середовищах, гаряче пресування та штампування), що у результаті дозволить створити нові порошкові композиційні матеріали.

Метою роботи є дослідження фазо-та структуроутворення алюмоматричних композиційних матеріалів зміцнених карбідом титану під час їх термічного синтезу, а також вивчення впливу фазового складу композитів на температуру синтезу.

В якості вихідних компонентів для приготування шихти та подальшого термічного синтезу використовували порошки алюмінію (марки ПА-4), титану (марки ПТХ-80) та вуглецю. Для оцінки впливу співвідношення компонентів суміші на структуру синтезованих лігатур було вибрано чотири склади вихідної шихти, що включають різний вміст алюмінію (від 45 до 60 %, мас.). Співвідношення між вуглецем та титаном відповідало стехіометричному складу (табл. 1).

Таблиця 1 - Вміст компонентів вихідних сумішей композитів Al-Ti-C

№ суміші	Содержание элементов, % (масс.)		
	Al	C	Ti
1	45	11	44
2	50	10	40
3	55	9	36
4	60	8	32

Вихідні суміші пресували під тиском 500 МПа, термічний синтез проводили у вакуумній печі індукційного нагріву при температурі 950 °С та витримці 1 година зі швидкістю спікання 5-10 град./хв.

Результати СЕМ, рентгенофазового аналізу і диференціального термічного аналізу зразків, синтезованих з порошкових сумішей різного складу дозволили встановити, що для всіх досліджуваних складів вихідних сумішей при їх нагріванні відбувається *in-situ* виділення часток карбиду титану TiC і невеликої кількості алюмінідів титану. Встановлено, що розмір часток карбиду титану, що утворився після термічного синтезу дорівнює 0,8 – 1,5 мкм. Проведені дослідження показали, що значної зміни фазового складу матеріалів зі зміною температури синтезу не спостерігається, тому в подальшому для отримання горячештампованих композитів на основі алюмінію можемо використовувати попередньо синтезовані спеки при температурі 950 °С. Також, було досліджено вплив вмісту алюмінію на параметри ґратки карбиду титану. У всіх зразків дифракційні лінії карбиду титану знаходяться приблизно на одному і тому ж куті, що і пояснює близькі значення періоду решітки TiC та дорівнюють 0,4322 – 0,4325 нм. Встановлено вплив компонентного складу вихідної шихти на особливості структури та фазовий склад термічно синтезованого спеку системи Al-C-Ti. Показано, що в разі використання шихти із стехіометричним по відношенню до титану вмістом вуглецю переважною зміцнюючою фазою сплаву є карбід титану.

#### Список літератури:

[1] Metal Matrix Composites [Electronic resource] / ed. by K. U. Kainer. – [S. l.]: Wiley, 2006.

- [2] Adebisi A. A. Metal Matrix Composite Brake Rotor: Historical Development and Product Life Cycle Analysis [Electronic resource] / A. A. Adebisi, M. A. Maleque, M. M. Rahman // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 4. – P. 471–480.
- [3] Амосов, А.П.. Применение процессов СВС для получения in-situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными керамическими частицами: обзор / А.П. Амосов, А.Р. Луц, Е.И. Латухин, А.А. Ермошкин // Изв. Вузов. Цветная металлургия. - 2016. - №1.- С. 39-49.
- [4] Rana R.S. Review of Recent Studies in Al Matrix Composites / R.S. Rana, R. Purohit, S. Das // International Journal of Scientific Engineering and Research. – 2012. - Vol. 3. – P. 1-16.

## КОРОЗИЙНА ПОВЕДІНКА АДИТИВНО ВИГОТОВЛЕНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ У ХЛОРИДНІЙ КИСЛОТІ

<sup>1</sup>ЛАВРИСЬ С. М., к. т. н., наук. співроб.,

[lavrys92@gmail.com](mailto:lavrys92@gmail.com)

<sup>2</sup>ШЛЯХЕТКА Х. С., к. т. н., мол. наук. співроб.,

[khshvachko@gmail.com](mailto:khshvachko@gmail.com)

<sup>1</sup>ДАНИЛЯК О.-М. М., к. х. н., наук. співроб.,

[danyliak-olena@ukr.net](mailto:danyliak-olena@ukr.net)

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

<sup>2</sup>Centre for Advanced Materials Application SAS, Bratislava, Slovakia

У наукових і промислових лабораторних центрах активно розвивають напрямок виготовлення титанових виробів інноваційними та економічними методами адитивних технологій. Основними перевагами яких є високий коефіцієнт використання матеріалу для готової продукції (до 99%), економічність, можливість виготовляти деталі складної просторової конфігурації з отворами чи внутрішніми пустотами, а також короткий термін виготовлення, швидке проектування, гнучкість виробництва, екологічність, ефективність для малих партій.

Так, адитивне виробництво дає можливість виготовляти дешеві титанові вироби, які контактують з агресивними середовищами для металургійної, енергетичної, хімічної та нафтовидобувної промисловості. Для прикладу, титанові сплави використовують для комплектуючих устаткувань (запірна арматура, крани, трубки тощо), у металургійній промисловості під час виготовлення титану (хлорування), нікелю (електрорафінування) тощо, де однією із вимог до таких деталей є їх висока корозійна тривкість у хлорвмісних розчинах. У хімічній промисловості для виготовлення насосів та комплектуючого обладнання для відновлювання агресивних кислот, в ті і хлоридної. Також титановий сплав є привабливим матеріалом для облицювання та фільтрів димоходів на теплових електростанціях та труб та їх комплектуючих для нафтових свердловин [1–3].

Однак на сьогодні корозійна тривкість титанових сплавів, виготовлених різними методами адитивного виробництва, є малодослідженою. Тому, мета дослідження – встановити корозійну тривкість адитивно виготовлених титанових

сплавів у розчині хлоридної кислоти та порівняти отримані результати з аналогічними для сплавів, отриманих за традиційною технологією.

Досліджували  $\alpha$  та псевдо  $\alpha$  титанові сплави марки ВТ1-0 та ВТ20, виготовлених за традиційною (ТТ) та адитивною (АТ) технологіями, відповідно.

Для адитивного виготовлення титанових сплавів використовували електронно-променево плавлення (ЕПП). ЕПП реалізовували на малогабаритній установці СВ-212М з імпульсним джерелом живлення та електронно-променевою гарматою ЄЛС, розробленою в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [4]. Нарощували титанові сплави на титанові пластини у вакуумній ( $13 \cdot 10^{-3}$  Па) камері, де сфокусований пучок електронів створював зону плавлення і формувал виріб, переміщаючись за заданою траєкторією. Для ЕПП використовували вітчизняний технічно чистий чи легований (Ti-Al-Mo-V-Zr) титановий порошок несферичної форми, який отримували методом гідрування-дегідрування у АТ «Інститут титану».

Згідно з результатами гравіметричного аналізу (табл. 1) після експозиції 1440 год у розчині 20%-му HCl титанові сплави, отримані за АТ, розчиняються активніше і їх швидкість корозії ( $K_{\text{кор}}$ ) більша, ніж сплавів, отриманих за ТТ. Слід також відзначити, що ТТ забезпечує нижчу корозійну тривкість сплаву ВТ1-0 (~ 2,5 рази), ніж сплаву ВТ20. Натомість різниця між швидкостями корозії ВТ1-0 та ВТ20, виготовлених АТ, є мінімальною, причому кращі корозійні властивості має сплав ВТ1-0.

Результати електрохімічних випробувань добре корелюють із гравіметричними (табл.). Згідно з отриманими результатами сплави, отримані за АТ, мають вищі значення струму корозії ( $i_{\text{кор}}$ ), ніж сплави, виготовлені ТТ. Це вказує на те, що для сплавів, виготовлених за АТ, під час електрохімічних випробувань корозія відбувається інтенсивніше, а пасивація, навпаки, сповільнюється. Щодо потенціалу корозії ( $E_{\text{кор}}$ ), то великої різниці між його значеннями у титанових сплавах, виготовлених за різними технологіями, не фіксуємо. Найвищі значення потенціалу корозії (табл.) спостерігаємо для сплаву ВТ1-0, виготовленого за ТТ, що вказує на його ушляхетнення та формування стабільнішої пасивної плівки на поверхні.

Тому можна стверджувати, що титанові сплави, виготовлені за АТ, мають гіршу корозійну тривкість, ніж сплави, виготовлені за ТТ. При цьому найнижчі значення струму корозії отримуємо для сплаву ВТ20, виготовленого ТТ, що добре корелює із значеннями швидкості корозії. Тобто із усієї вибірки сплав ВТ20, виготовлений ТТ, має найвищу корозійну тривкість, натомість цей же сплав, виготовлений АТ – найнижчу (табл.).

*Таблиця – Електрохімічні параметри для титанових сплавів, виготовлених за різними технологіями у 20%-му НСІ*

Сплав	Технологія	$E_{\text{согг}}$ , В	$i_{\text{согг}}$ , $\text{А} \cdot \text{М}^{-2}$	$K_{\text{согг}}$ , $\text{Г} \cdot \text{ММ}^{-2} \cdot \text{ГОД}^{-1}$
ВТ1-0	ТТ	-0,3859	0,2424	0,378
ВТ1-0	АТ	-0,4427	0,3628	0,422
ВТ20	ТТ	-0,4876	0,0965	0,159
ВТ20	АТ	-0,4264	1,1058	0,436

Таким чином, можна зробити висновок, що отримані АТ титанові сплави мають нижчу корозійну тривкість у 20%-му розчині хлоридної кислоти, ніж сплави, отримані за ТТ. Нижчу корозійну тривкість адитивно виготовлених  $\alpha$  (ВТ1-0) та псевдо  $\alpha$  (ВТ20) титанових сплавів пояснюємо формуванням під час ЕПШ структури Відманштетта (для ВТ1-0) та метастабільного мартенситу (для ВТ20), відповідно ніж сплавів виготовлених за ТТ.

### Список літератури:

- [1] The additive manufacturing (AM) of titanium alloys Dutta / B., Froes F.H. // Met. Powder Rep. – 2017. – 72. – P. 96–106.
- [2] Применение титановых порошков нового поколения (HDH2) в аддитивных технологиях / П. Д. Жеманюк, Ю. Ф. Басов, А. В. Овчинников, А. А. Джуган, А. В. Михайлютенко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2016. – 135. – С. 139–144.
- [3] Corrosion resistance of sintered commercially pure titanium in inorganic acids after oxidation and nitriding. / I. M. Pohrelyuk, A. G. Luk'yanenko, O. V. Tkachuk, Kh. S. Shlyahetka // JOM. – 2019. – 71. – P. 700–705.
- [4] Застосування адитивних електронно-променевиx технологій для виготовлення деталей з порошків титанового сплаву ВТ1-0 / В. М. Нестеренков, В. А. Матвійчук, М. О. Русиник, О. В. Овчинников // Автоматическая Сварка. – 2017. – 762. – С. 5–10.

## ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЛЕГОВАНИХ ХРОМ-ЦИРКОНІЄВИХ БРОНЗ В ЯКОСТІ КОНТАКТНИХ ПАР ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

ЛІХАЦЬКИЙ Р. Ф., аспірант,  
[richardlikhatskyi@gmail.com](mailto:richardlikhatskyi@gmail.com)

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ*

Контактні пари електротранспорту призначені для безпосередньої передачі електроенергії від мережі, до транспорту що рухається вздовж контактної лінії. Досі вченими не було створено оптимального матеріалу таких контактів і в різних країнах поширені різні варіації мідних сплавів, мідно-графітових композитів, тощо. Матеріал контактного елемента повинен відповідати таким вимогам:

- мати достатньо високі механічні властивості;
- електро- та теплопровідність матеріалу повинна бути високою;
- матеріал повинен бути дуже стійким до зношування тертям та погано піддаватись корозії;
- простота, дешевизна отримання та екологічність.

Найважчим завданням є поєднання високої електропровідності композиту з вагомим покращенням його механічних властивостей (рис. 1) [1]. У випадку мідних сплавів легування практично будь-якими металами значно знижуватиме провідні властивості. У містах України використовують зазвичай звичайні вуглецеві вставки з графіту або коксу. І хоча, їх швидке зношування призводить до необхідності частішої зміни цих елементів, простота та дешевизна виробництва тут виступає ключовим фактором. У випадку країн ЄС та США першочергове значення має екологічний фактор. Легування мідних елементів токсичними металами, що з часом потраплять у атмосферу зі зношуванням деталей є неприйнятним для зазначених країн [2].

Найперспективнішими матеріалами що могли б забезпечити необхідні властивості є бронзи. Вченими [3, 4] вивчались мідь-вуглецеві композити, що використовувались для виготовлення контактних елементів. Експлуатаційний термін в них значно підвищувався за рахунок частинок самих контактів, що відділялись від основної деталі під впливом тертя та дугової ерозії і фактично виступали в ролі «мастила» у контактній парі [5].

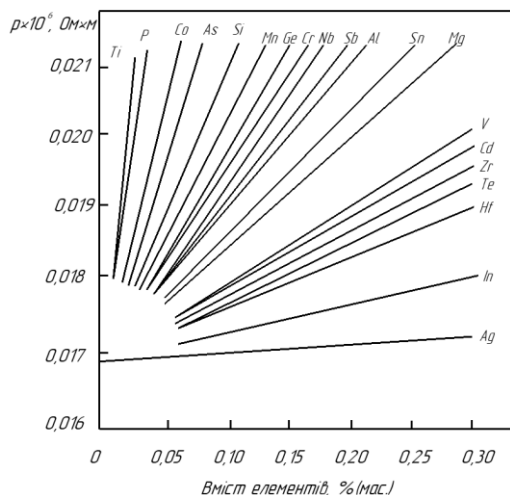


Рисунок 1. Вплив домішок на електричний опір мідного сплаву[1].

Існуючі композити мідних сплавів, в тому числі з вуглецем, що використовують в контактних парах, виготовляють методами порошкової металургії [6, 7]. Їх створення таким способом має ряд очевидних переваг:

- хороший контроль розподілу легуючих частинок в мідній матриці та розмірів цих частинок;
- можливість масового виготовлення в промисловості за рахунок відносно простоти виробництва;
- менший вплив легуючих частинок на зниження електропровідності отриманого композиту.

Мало досліджень проведено на тему отримання аналогічних композитів методами лиття. Складність контролю за рівномірністю розподілу, за отриманим хімічним складом, додаткові труднощі з додаванням до композиту тугоплавких елементів – все це фактично призводить до переважання методів порошкової металургії в промисловості. Однак за умови отримання композиту ливарними методами з рівномірним дрібнодисперсним розподілом частинок при правильно підібраній термічній обробці та пластичній деформації – механічні та експлуатаційні характеристики даного композиту були б кращими за аналогічні композити порошкової металургії.

Авторами [8, 9] були отримані сплави систем Cu-V, Cu-Cr-Zr-V, Cu-Cr-Zr-Hf-V методом лиття плавкою в електронно-променевої установці в вакуумі. Під час заливки розплав піддавався електромагнітному перемішуванню та заливався в



товстостінний кокіль з метою прискорення процесів кристалізації і, відповідно, отримання більш рівномірного розподілу легуючих компонентів. Ванадій в даних композитах покращує механічні властивості в цілому, а розмір і розподіл частинок в різних композитах (рис. 2) не призводитиме до значного зниження електропровідності. Одержання таких систем свідчить про можливість їх виплавки в промисловості використовуючи концентровані джерела нагріву, а не лише методи порошкової металургії. З мікроструктур помітно що ванадій також призводить до незначного подрібнення зерна у випадку більш складніших систем з хромом, цирконієм і гафнієм.

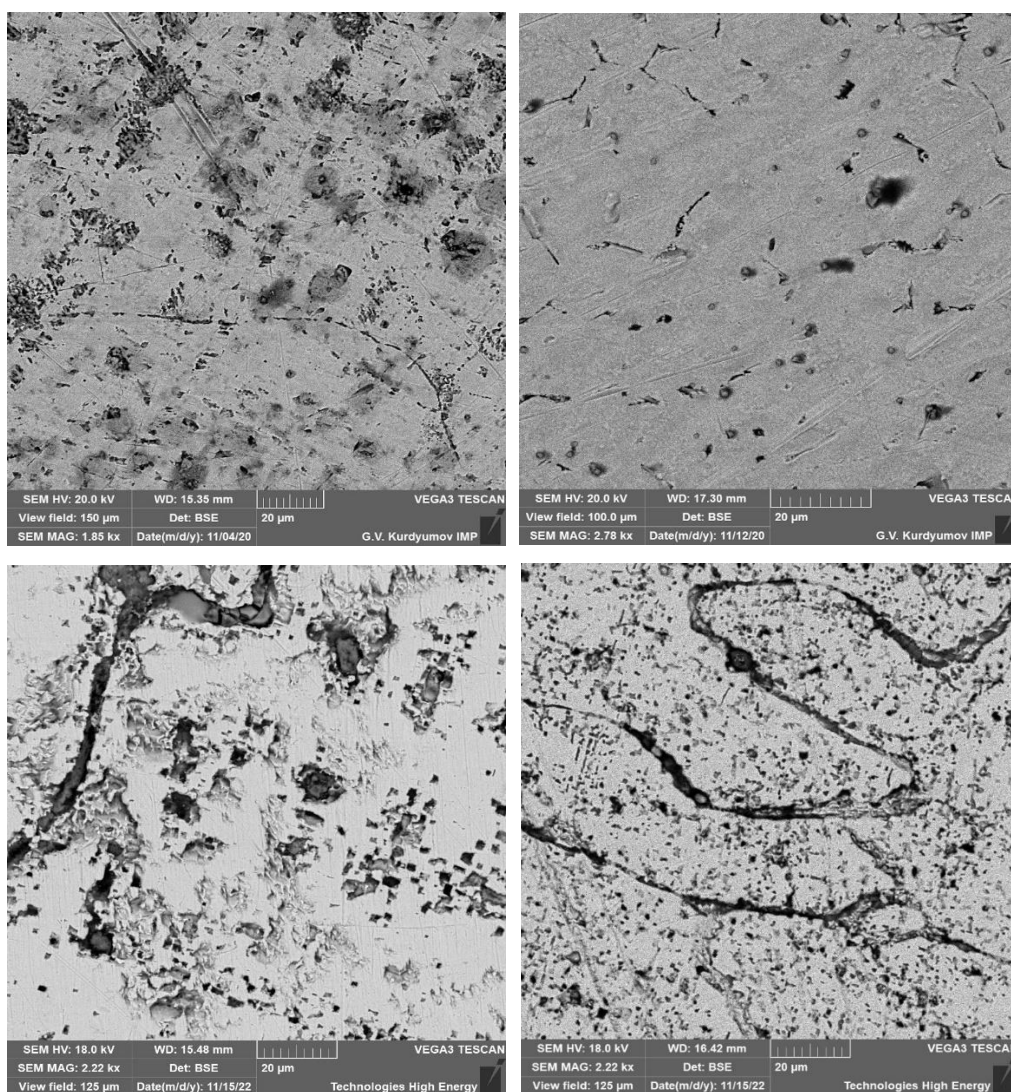


Рисунок 2. Мікроструктури центральних частин зразків: ліворуч, зверху –  $\text{Cu-0.2V}$ ; праворуч зверху –  $\text{Cu-Cr-Zr-V}$  (до 0,7 %мас. хрому); ліворуч знизу –  $\text{Cu-Cr-Zr-V}$  (до 0,4 %мас. хрому); праворуч знизу –  $\text{Cu-Cr-Zr-Hf-V}$  (до 0,6 %мас. хрому)[8, 9].

Отримання мідних композитів методами лиття відкриває широкі можливості для отримання більш якісних систем контактних пар електротранспорту і потребує подальших досліджень. При цьому підбір легуючих елементів повинен бути спрямований не лише на покращення механічних, зносостійких властивостей при максимальному збереженні електропровідності. Можливо, варто більш детально вивчати системи композитів в яких частинки, що відділяються, знижували б тертя в контактній парі, змащуючи та забиваючи пори після ерозії, таким чином підвищуючи довговічність контактних елементів.

### Список літератури:

- [1] Alloy Phase Diagrams / ed. by H. Okamoto, M. E. Schlesinger, E. M. Mueller. – [S. l.] : ASM International, 2016. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v03.9781627081634>.
- [2] Zhang R. The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios / Runsen Zhang, Shinichiro Fujimori // Environmental Research Letters. – 2020. – Vol. 15, no. 3. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6658>.
- [3] Баб'як, М. О. Експлуатація ресурсозберігаючих контактних елементів міського електричного транспорту / М. О. Баб'як // Вісник східноукраїнського нац. ун. ім. В. Даля. – 2019. - № 3(251). – С. 33-38.
- [4] Cantürk S. B. Review of Recent Development in Copper/Carbon Composites Prepared by Infiltration Technique / Selim Burak Cantürk, Jaroslav Kováčik // Energies. – 2022. – Vol. 15, no. 14. – P. 5227. <https://doi.org/10.3390/en15145227>.
- [5] Баб'як М. О., Горобець В. Л., Артемчук В. В. Дослідження фіз.-мех. власт. накладок пантографів, що застосовуються в якості струмоз'ємних елементів електрорухомого складу // Ел. контакти та електроди : зб. наук. пр. – Київ, 2016.
- [6] Highly enhanced mechanical properties in Cu matrix composites reinforced with graphene decorated metallic nanoparticles / Meixia Li [et al.] // Journal of Materials Science. – 2014. – Vol. 49, no. 10. – P. 3725–3731. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8082-x>.
- [7] Enhanced Mechanical Properties of Graphene/Copper Nanocomposites Using a Molecular-Level Mixing Process/ Jaewon Hwang [et al.] // Advanced Materials. – 2013. – Vol. 25, no. 46. – P. 6724-6729. <https://doi.org/10.1002/adma.201302495>.
- [8] Likhatskyi R. F. Special Copper-Based Alloys and Composites and Methods of Their Production / R. F. Likhatskyi // Casting processes. – 2020. – Т. 139, № 1. – С. 61–68. <https://doi.org/10.15407/plit2020.01.061>.
- [9] Ліхацький Р. Ф. Механічні властивості сплавів системи Cu-V отриманих в умовах електронно-променевої ливарної технології / Р. Ф. Ліхацький, М. М. Ворон // XVII Міжнародна НПК Литво. Металургія, Запоріжжя. – 2021. – С. 111–113.

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПІДГОТОВКИ ТА ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ РІДКОГО ЧАВУНУ МАГНІЄМ ДЛЯ КОНВЕРТЕРНОГО ПЕРЕДІЛУ

**МАНАЧИН І. О.**, к. т. н., ст. досл., старший науковий співробітник,

[imanachyn@gmail.com](mailto:imanachyn@gmail.com)

**ШЕВЧЕНКО А. П.**, д. т. н., проф., провідний науковий співробітник,

[ovoch-isi@outlook.com](mailto:ovoch-isi@outlook.com)

**КИСЛЯКОВ В. Г.**, к. т. н., завідувач відділу,

[ovoch-isi@outlook.com](mailto:ovoch-isi@outlook.com)

**ДВОСКІН Б. В.**, к. т. н., старший науковий співробітник,

[ovoch-isi@outlook.com](mailto:ovoch-isi@outlook.com)

*Інститут чорної металургії ім. З. І Некрасова НАН України, м. Дніпро*

Сучасний стан виробництва продукції у чорній металургії вимагає підвищення продуктивності, ефективності та зниження витрат на кожному з металургійних переділів, особливо при виробництві високоякісних марок сталі та визначає необхідність серйозного підходу до вдосконалення процесів та складових технологічної схеми підготовки та подачі рідкого чавуну для конвертерного переділу. Процес підготовки та подачі рідкого чавуну для конвертерного переділу можна розділити на такі технологічні складові:

- наповнення ковшів чавуном у доменному цеху та їх транспортування до наступної технологічної зони;
- позапічна десульфурація чавуну;
- очищення чавуну від ковшового шлаку;
- зберігання чавуну в конвертерному цеху, підготовка та заливання знесірченого чавуну в конвертер.

З метою виключення негативного впливу ковшових шлаків на ефективність та стабільність процесу десульфурації чавуну рекомендується перед початком наповнення ковшів чавуном подавати на дно ковша добавки у вигляді відходів виробництва металургійного вапна, що підвищують основність та сульфідну ємність ковшового шлаку у кількості 1,5 – 2,5 кг/т чавуну.

Для зниження втрат температури чавуну при наповненні ковшів рекомендується скорочувати до мінімуму час оборотності ковшів, використовувати кришки, що встановлюються на горловину ковшів після зливу чавуну, а також застосовувати підігрів ковшів доменним газом.

За проведеним аналізом [1] найбільш ефективною технологією десульфурації чавуну є моноінжекція магнію, яка забезпечує з високою стабільністю отримання чавуну з необхідним вмістом сірки, аж до  $\leq 0,001\%$ . Промисловий досвід реалізації процесу десульфурації чавуну моноінжекцією магнію в ківшах різного типорозміру на різних металургійних комбінатах [2] показав, що зі збільшенням маси чавуну, що обробляється, зростає ефективність десульфурації, знижуються необхідні питомі витрати магнію і втрати температури чавуну в період вдування магнію. Встановлені закономірності обґрунтовуються збільшенням глибини вдування магнію та створенням більш сприятливих умов його розчинення і засвоєння.

Для підвищення ефективності очищення чавуну від високосірчистого ковшового шлаку, зниження втрат чавуну при скачуванні шлаку і скорочення тривалості операції очищення чавуну рекомендується продувати чавун азотом в процесі скачування шлаку або використовувати «бабблери», що забезпечують переміщення масиву шлаку в зону видалення машинами скачування шлаку.

#### **Список літератури:**

- [1] ШЕВЧЕНКО, А. П., et al. Позапічна десульфурація чавуну в ковшах. Технологія. Дослідження. Аналіз. Вдосконалення.—Дніпро: Дніпро–VAL, 2017.
- [2] Shevchenko, A. F., et al. "Modern High-Performance Complexes of Extra-Deep Desulphurization of Cast iron by Mono-Injection of Magnesium."-Metallurgist- 2019.-: P. 965-973.

## МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СПЛАВУ ВТ6 МЕХАНІЧНИМИ ВИСОКОЧАСТОТНИМИ УДАРАМИ

**МОГИЛКО В. В.**, аспірант,

[vlad.mohylko@gmail.com](mailto:vlad.mohylko@gmail.com)

**БУРМАК А. П.**, к. т. н., доцент

**ВОЛОШКО С. М.**, д. ф.-м. н., професор

**ФРАНЧІК Н. В.**, к. т. н.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ*

Титан і титанові сплави найбільш перспективні конструкційні матеріали, які одержали широке застосування в аерокосмічній, автомобільній, кораблебудівній та інших галузях промисловості, завдяки своїм характеристикам, таким як: висока питома міцність та корозійна стійкість, біологічна сумісність та відносно низький модуль пружності [1]. Однак, відомо, що вони мають відносно низьку твердість та зносостійкість, що обмежує їх впровадження та застосування. Крім того, титан та його сплави мають високу хімічну активність, що може призвести до формування крихких хімічних сполук, які можуть сприяти руйнуванню поверхні матеріалу за рахунок утворення дефектів та тріщин [2]. Підвищення трибологічних та інших характеристик міцності титану та його сплавів за допомогою різних методів модифікації поверхні є актуальним завданням сучасного матеріалознавства та машинобудування. Найбільш поширеними є технології обробки металевих поверхонь, засновані на формуванні нанокристалічної структури в поверхневих шарах шляхом інтенсивної пластичної деформації (ПД). З перспективних методів одержання нанокристалічної структури (30–100 нм) різних металевих матеріалів є технологія ВЧЗК (*SMAT — surface mechanical attrition treatment*) [3].

У роботі [4] проведено оброблення стопу ВТ6 за допомогою 500 кульок з оксиду цирконію діаметром 2,5 мм упродовж 480 с, 960 с і 1920 с. Мікротвердість оброблених зразків досягає максимальних значень 437,1  $HV_{0,025}$ , 448,9  $HV_{0,025}$  та 468  $HV_{0,025}$  (у вихідному стані — 372  $HV_{0,025}$ ) відповідно, а глибина модифікованого шару — приблизно 290 мкм, 330 мкм та 390 мкм. Максимальна мікротвердість за тривалості обробки 1920 с на 25 % вища, ніж для необробленого

зразка за рахунок подрібнення зерен, високої густини дислокацій та залишкових напружень стиснення ( $-653$  МПа,  $-741$  МПа і  $-875$  МПа відповідно).

Інтерес представляють також результати [5] стосовно порівняння ефективності дробоструменевої обробки (ДО – SP) та ВЧЗК. Основні відмінності полягають у розмірі дробу (від  $0,25$  мм до  $1$  мм – для ДО і від  $1$  мм до  $8$  мм – для ВЧЗК) та швидкості (від  $20$  м/с до  $150$  м/с – для SP і від  $3$  м/с до  $20$  м/с – для ВЧЗК), а також різній формі елементів, що обробляють поверхню, оскільки для SMAT це жорсткі сфери правильної форми. Звичайна дробоструменева обробка, на відміну від ВЧЗК, створює більш шорстку поверхню, яка виявляється пошкодженою і потребує подальшого інтенсивного полірування.

Високу ефективність щодо зміцнення та підвищення втомних характеристик металевих матеріалів демонструє також технологія ВЧУО [6]. Тому, метою роботи є порівняння ефективності високочастотної ВЧЗК сталевими кульками та високочастотної ударної обробки – ВЧУО сталевим циліндричним бойком для зміцнення поверхні титанових сплавів на прикладі ВТ6, що вже апробовані у роботі [7].

Об'єкт дослідження – зразки титанового сплаву ВТ6 у вигляді пластин діаметром  $20$  мм і товщиною  $3$  мм ( $\pm 0,5$  мм), які одержувалися шляхом різання з прутків перпендикулярно напрямку гарячої прокатки. Хімічний склад (ваг. %): Ti –  $85,21$  %; Al –  $6,18$  %; V –  $4,28$  %. Перед обробкою зразки відпалювались у вакуумі ( $P = 10^{-3}$  Па) за температури  $700$  °С впродовж  $2$  годин і охолоджувалися разом з піччю. У вихідному стані титановий сплав ВТ6 складається із  $\alpha$ (ГЦП)-фази та  $\beta$ (ОЦК)-фази.

Високочастотна ударна обробка поверхні кульками з нержавіючої сталі діаметром  $2$  мм проводилась на повітрі за допомогою пристрою, який складається з цифрового електронного генератора, ультразвукової коливальної системи та камери для обробки зразків за методикою, яка наведена у роботі [8]. Амплітуда ультразвукових механічних коливань (peak-to-peak) складала  $2A = 50$  мкм, тривалість обробки – від  $30$  с до  $240$  с, відстань до зразка –  $10$  мм, кількість кульок –  $35$ .

ВЧУО на повітрі упродовж  $120$  с проводилась за методикою [7]. Використовувався бойок циліндричної форми діаметром  $5$  мм із загартованої

сталі ШХ15, який коливався у високочастотному діапазоні (1–3 кГц). Зразок знаходився у зоні дії бойка за умов, наближених до квазігідростатичного стискання.

Вимірювання мікротвердості проводилось на приладі ПМТ-3 за методом Вікерса із навантаженням 100 г. Рентгеноструктурний фазовий аналіз проведено з використанням дифрактометру Rigaku Ultima IV, з графітовим монохроматором, у мідному випромінюванні ( $\lambda_{CuK\alpha} = 0,15418$  нм) з використанням схеми фокусування за Бреггом-Брентано. Умови проведення досліджень: інтервал кутів  $2\Theta = 20^\circ - 120^\circ$ , крок реєстрації –  $0,04^\circ$ , час витримки в точці – 2 с; тривалість реєстрації дифрактограми одного зразка – 90 хв. Визначення величини напружень 1-го роду проведено методом  $\sin^2\psi$  з використанням дифракційного максимуму (102) та значень кутів  $\psi=0^\circ, -10^\circ, -20^\circ, -30^\circ, -40^\circ$ . Обробка отриманих спектрів проведена з використанням програмного забезпечення Rigaku.

Результати вимірювання зміни мікротвердості для сплаву ВТ6 після ВЧЗК різної тривалості (1) та після ВЧУО за даними [7] (2) наведено на рис.1, а. Мікротвердість максимально збільшується вдвічі після ВЧУО тривалістю 120 с і в 1,4 рази після ВЧЗК тривалістю 150 с. Подальше збільшення часу обробки призводить до початку релаксаційних процесів, спричинених деформаційним нагріванням поверхні та відповідного зменшення мікротвердості.

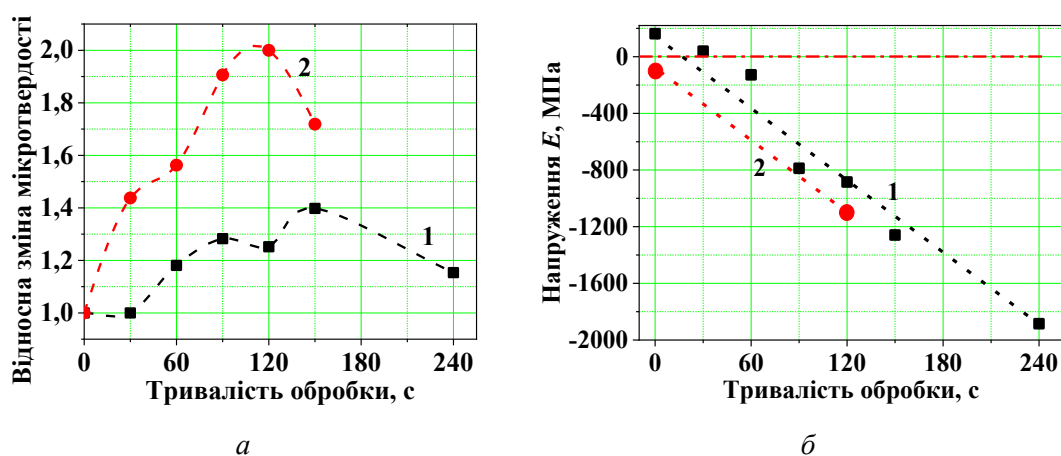
ПД поверхні через зміни в мікроструктурі сприяє формуванню в приповерхневих шарах напружень стиснення високого рівня, що є основною причиною підвищення опору втомі металевих матеріалів. Порівняння напружень стиснення після ВЧУО [7] та ВЧЗК (рис. 1, б) засвідчує практично однаковий характер їх змін із збільшенням тривалості обробки із дещо вищими значеннями після ВЧУО. Слід зазначити, що такої суттєвої різниці значень, як для мікротвердості, у даному випадку не спостерігається.

Результати рентгеноструктурного аналізу наведено в табл. 1. У вихідному стані для сплаву ВТ6 характерні напруження розтягу величиною  $\sim 162$  МПа.

На відміну від змін мікротвердості з тривалістю обробки, спостерігається монотонне збільшення величини залишкових макроскопічних напружень з часом, при цьому напруження стають стискаючими.

За умов досягнення максимального зміцнення значення напружень стиснення для ВЧЗК навіть перевищує те, що фіксується для ВЧУО: -1259 МПа проти -1050 МПа. За тривалості обробки ВЧЗК 240 с досягається рекордний рівень напружень стиснення -1885 МПа. Можна зробити висновок, що формування стискаючих напружень в поверхневому шарі сплаву ВТ6 є одним з важливих факторів зміцнення за умов обробки як методом ВЧУО, так і ВЧЗК.

Рисунок 1. Відносна зміна мікротвердості (а) та рівень залишкових напружень (б) в сплаві ВТ6 після ВЧЗК тертям (1) та ВЧУО на повітрі (2) за результатами [7]



Таблиця 1. Порівняння впливу ВЧЗК та ВЧУО на розмір ОКР, ступінь мікродеформації ( $\epsilon$ ), параметр ґратки ( $a$ ), макронапруження ( $\sigma_R$ ) та фазовий склад

ВЧЗК сталевими кульками										
$\tau$ , с	ОКР, нм		$\epsilon$ , %		Параметр ґратки $a$ , нм		Склад, ваг. %			$\sigma_R$ , МПа
	$\alpha$ -Ti	$\beta$ -Ti	$\alpha$ -Ti	$\beta$ -Ti	$\alpha$ -Ti	$\beta$ -Ti	$\alpha$ -Ti	$\beta$ -Ti	TiO <sub>2</sub>	
Вих. стан	157	174	0,16	0,22	0,2918	0,3191	84	15	1	162
30	58	56	0,28	0,21	0,2930	0,3152	80,5	16	3,5	38
60	35	32	0,33	0,63	0,2932	0,3167	80	13	7	-128
90	19	19	0,28	0,38	0,2933	0,3156	85	10	5	-788
120	16	17	0,23	0,32	0,2937	0,3313	80	15	5	-885
150	17	21	0,17	0,21	0,2939	0,3311	81	11,5	7,5	-1259
240	13	22	0,2	0,21	0,2933	0,3013	80	11	9	-1885
ВЧУО сталевим бойком										
120	31	41	0,33	0,12	0,2920	0,3295	81	5	14	-1050



Отже, в роботі показана можливість підвищення мікротвердості поверхневих шарів титанового сплаву ВТ6 у 1,4 рази швидкоплинною високочастотною поверхневою механічною обробкою сталевими кульками діаметром 2 мм за кімнатної температури. Перевагою ВЧЗК є більш швидке подрібнення структури до менших розмірів кристалітів як  $\alpha$ -, так і  $\beta$ -фаз, а також досягнення більш високих значень макроскопічних напружень стиснення. Крім того, не відбувається масоперенесення Fe з ударних елементів, тоді як після ВЧУО на повітрі його вміст може складати до 15 ат.% [7].

### Список літератури:

- [1] Kuroda D. Design and mechanical properties of new  $\beta$  type titanium alloys for implant materials / D. Kuroda, M. Niinomi, M. Morinaga, et al. // *Mat. Sci. Eng. A.* – 1998. – Vol. 243, Issues 1–2. – P. 244–249.
- [2] Vasylyev M.O. Effect of Low-Energy Inert-Gas Ion Bombardment of the Metal Surface on the Oxygen Adsorption and Oxidation / M. O. Vasylyev, S. I. Sidorenko, S. M. Voloshko, T. Ishikawa // *Usp. Fiz. Met.* – 2016. – Vol. 17. – P. 209–228.
- [3] Nairong T. Development of Nanostructures in Metallic Materials with Low Stacking Fault Energies During Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) / N.R. Tao, H.W. Zhang, J. Lu, and K. Lu // *Mater. Trans.* – 2003. – Vol. 44, Issue 10. – P. 1919–1925.
- [4] Zhang Q. Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti–6Al–4V alloy / Q. Zhang, B.B. Duan, Z.Q. Zhang, et al. // *J. Mater. Res. Technol.* – 2021. – Vol. 11. – P. 1090–1099.
- [5] Gallitelli D. Comparison between Conventional Shot Peening (SP) and Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT) on a Titanium Alloy / D. Gallitelli, D. Reirant, and E. Rouhaud // *Adv. Mater. Res.* – 2014. – Vol. 996. – P. 964–968.
- [6] Фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь [Текст] : [монографія] / Г. І. Прокопенко [та ін.]. – Київ : Наукова думка, 2017. – 467 с.
- [7] Механічні властивості, фазовий і хемічний склади поверхні стопу ВТ6 після УЗУО в хемічно активних і нейтральному середовищах / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк, Г.І. Прокопенко, С.М. Волошко, Л.Ф. Яценко, Н.І. Хріпта // *Металлофізика и новейшие технологии.* – 2018. – Т. 40, № 8. – С. 1029–1049.
- [8] Зміцнення поверхні стопу ВТ6 механічними високочастотними ударами / А. П. Бурмак, С. М. Волошко, Б. М. Мордюк [та ін.] // *Металлофізика та новітні технології.* – 2022. – Т. 44, № 11. – С. 1453–1474.

## ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КЕРАМІЧНИХ ЛИВАРНИХ ФОРМ

**НЕЙМА О. В.**, мол. наук. співроб. відділу фізико-хімії ливарних процесів,  
[Neima\\_Alex@ukr.net](mailto:Neima_Alex@ukr.net)  
*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ*

Однією з найбільш ефективних технологій отримання складнопрофільних тонкостінних виливків, особливо в одиничному та дрібносерійному виробництві, є технологія лиття в оболонкові керамічні форми із використанням полімерних (полістирол, пластики) моделей, що випаляються. Пінополістиролові моделі виготовляються автоклавним способом або на ЧПК-станках. Моделі ж з різного роду пластиків отримують за допомогою адитивних технологій (3D-друку).

В порівнянні з традиційною технологією лиття в керамічні оболонкові форми, де використовують витоплювані восковмісні моделі (спосіб ЛВМ), застосування адитивного виробництва дозволяє різко скоротити термін виготовлення пластикових моделей, підвищити їх точність та збільшити гнучкість виробництва виливків. Однак приклади застосування полімерів в якості разових моделей показують, що при їх видаленні (випалюванні) з оболонкових форм відбувається розтріскування кераміки та утворюється зольний залишок, що вказує на необхідність підбору оптимальних термо-кінетичних режимів видалення полімерних моделей з керамічних форм та мінімізацію кількості продуктів їх термодеструкції (зольний залишок).

**Мета роботи – вибрати матеріали моделей, які забезпечать точне відтворення контурів, чистоти поверхні і розмірів виливків, та розробити способи видалення разових моделей з керамічних форм, що запобігатимуть утворенню тріщин в кераміці.**

Ливарні моделі з різних матеріалів по-різному впливають на якість керамічних форм та, відповідно, на якість поверхні майбутніх виливків. Так, наприклад, моделі з пінополістиролу мають комірчасту поверхню, яка буде негативно впливати на шорохуватість поверхні виливків. Якість поверхні моделей отриманих за допомогою адитивних технологій буде залежати від типу матеріалу моделей та способу їх виготовлення.

Враховуючи такі характеристики, як розмірна точність, чистота поверхні, зольність, коефіцієнт термічного розширення при випалюванні, міцність, усадка та вартість було відібрано та досліджено зразки разових моделей різної конфігурації, що виготовлені методом 3D друку, з наступних видів широко розповсюджених матеріалів: полілактиду (PLA), акрилонітрілбутадієнстіролу (ABS), полікарбонату (PC), поліетилентерефталату (PET), кополіетилентерефталату (Co-PET), поліаміду PA-12 та фотополімеру. Зразки виготовлялися циліндричної та прямокутної форми. Моделі зразків з пластиків були надруковані на 3D-принтері KLEMA 250 з робочою областю друку 250 x 250 x 350 мм. Встановлено, що найкращу якість поверхні мають зразки з поліаміду PA-12 та фотополімеру, а найкращу розмірну точність та низьку усадку – PLA пластик.

Для проведення лабораторних випробувань була виготовлена партія керамічних оболонок за даними моделями. Керамічні форми виготовляли на основі корунду за технологічними етапами сучасного способу лиття за моделями, що витоплюються. Для видалення моделей з керамічних форм запропоновано та випробувано спосіб двоетапного випалювання.

Первинне випалювання виконували в камері лабораторної сушильної електрошафи СНОЛ 67/350 протягом 2 годин. Форми одночасно завантажували та піддавали термічному обробленню при поступовому підвищенні температури від 20 до 350 °С з метою компактування, розм'якшення, розкладання та первинного газовиділення матеріалу моделей. При цьому, моделі з PLA пластику майже повністю газифікувалися з невеликим зольним залишком. Пластики PC, PET, Co-PET частково витоплювалися не призводячи до розтріскування оболонок, тоді як моделі з ABS, поліаміду PA-12 та фотополімеру не витоплювались, а викликали розтріскування керамічних оболонок внаслідок неконтрольованого тиску газів всередині форми та підвищеному термічному розширенню моделей. Для уникнення цих дефектів рекомендується друкувати моделі з неповним заповненням та використовувати вихідні канали та промивники в оболонковій формі.

Високотемпературна фаза випалювання (2 етап) проводилася в електричній муфельній печі марки СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2 одночасно з процесом

прожарювання оболонки форми за режимом: нагрівання до температури 1000 – 1100 °С зі швидкістю 120 – 130 °С і наступною витримкою протягом 2-х годин. В інтервалі температур 500 – 600 °С спостерігалось підвищене газовиділення. Високотемпературний етап випалювання дозволяє в повній мірі видалити залишки модельного матеріалу з форми.

На основі отриманих результатів було розроблено оптимальні з технологічної точки зору режими видалення обраних полімерних моделей з керамічних форм, а саме, двоетапне випалювання моделей в термічній печі.

З урахуванням проведених досліджень, а також екологічності та вартості для виготовлення разових моделей можна рекомендувати полілактид PLA, зниження шорсткості якого може бути досягнуто за рахунок нанесення тонкого шару воскоподібного матеріалу. PLA є одним з найбільш широко використовуваних термопластиків й повністю біорозкладним матеріалом, який при випалюванні газифікується без виділення їдких речовин.

З обраного матеріалу способом 3D-друку було виготовлено серію моделей різної конфігурації, за якими були отримані керамічні форми та проведено заливання дослідними сплавами.

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ

СЕМЕНКО А. Ю., к. т. н., старш. наук. співр.,

[semenko.au@gmail.com](mailto:semenko.au@gmail.com)

ГОЙДА Д. І., мол. наук. співр.,

[goydadani@gmail.com](mailto:goydadani@gmail.com)

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ*

На сьогоднішній день все більшу популярність при розробці технологій металургійного виробництва, зокрема розробці обладнання та пристроїв спеціального призначення, отримують методи чисельного моделювання. Це обґрунтовано, здебільшого, тим, що основними досліджуваними процесами у даній області є розливання, кристалізація та різні методи обробки металу.

Моделюванню процесів тепломасопереносу в промковшах приділяється досить багато уваги. Це, перш за все, пояснюється тим, що процес безперервного розливання сталі постійно вдосконалюється, а вимоги до якості заготовки зростають. Усі дослідження, присвячені проблематиці підвищення ефективності процесів безперервного розливання є комплексними. Точне визначення параметрів потоку рідкої сталі (а саме, просторовий розподіл компонентів швидкості, турбулентна кінетична енергія тощо) у промковші є необхідною умовою для аналізу або оптимізації ефективності процесу в цілому.

Відомо, що математичні моделі базуються переважно на рівняннях Нав'є-Стокса, які включають рівняння нерозривності (закон збереження маси); рівняння імпульсу (закон збереження імпульсу); рівняння енергії (закон збереження енергії). Ці закони, подані у вигляді диференціальних рівнянь, вирішуються методом кінцевих елементів із застосуванням прикладних пакетів для комп'ютерного моделювання руху рідини (ANSYS, OpenFOAM) або за допомогою програм, що самостійно розробляються та реалізують цей метод.

Для одержання результатів високої точності необхідно в зазначеній послідовності: провести аналіз основних структурних одиниць обладнання/технологічних ділянок; визначити розрахункову область обладнання/процесу; виконати креслення розрахункової області (Geometry); згенерувати сітку розрахунку (Mesh) з урахуванням особливостей геометрії

(товщини стінок, діаметрів отворів, типу обчислювального процесу і т. інш.); визначити граничні умови процесу (Solution) (даний етап вимагає найбільшої уваги, оскільки саме на ньому можливо керувати обчислювальним процесом за допомогою кореляції вхідних даних (характеристиками матеріалу, поверхні розрахункової області, витратними та температурно-часовими параметрами і т. інш.); провести налаштування та сам розрахунок (Results); провести аналіз одержаних даних та перевірку адекватності моделі (Discussion).

За останні 5 років співробітниками відділу магнітної гідродинаміки ФТІМС НАН України з використанням методів чисельного моделювання було:

- розроблено двокамерний магнітодинамічний проміжний ківш (МД-ПК) (рис. 1, а);

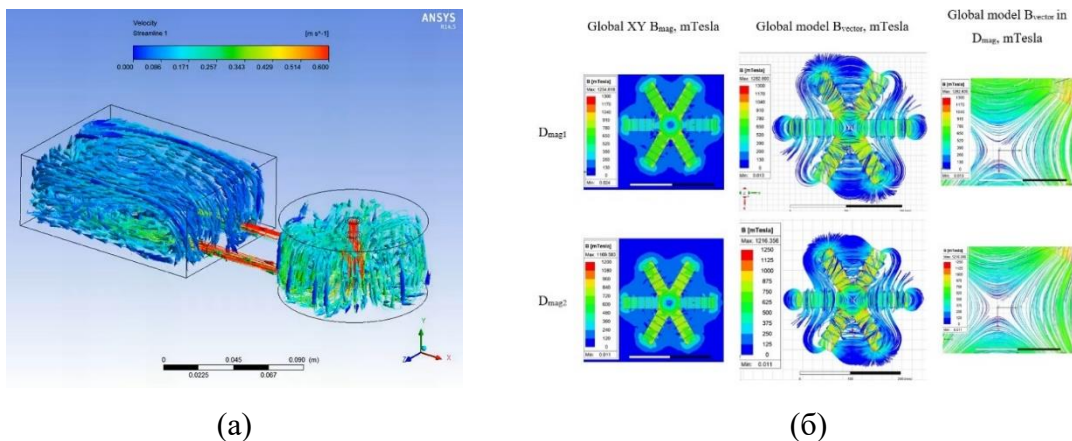


Рисунок 1. Використання чисельного моделювання: дослідження гідродинаміки рідкої сталі в двокамерному МД-ПК (а); дослідження розподілу магнітних силових ліній розробленого електромагнітного пристрою (б)

- розроблено електромагнітний пристрій з розширеними функціональними можливостями в частині стабілізації процесів розливання, перемішування і твердіння металу у кристалізаторі, що знижують швидкість заростання порожнини занурених стаканів машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) (рис. 1, б);

- проведено оцінку впливу процесів перемішування металу і шлаку в промковці сортових МБЛЗ на експлуатаційні властивості футерування при використанні металоприймача (рис. 2, а);

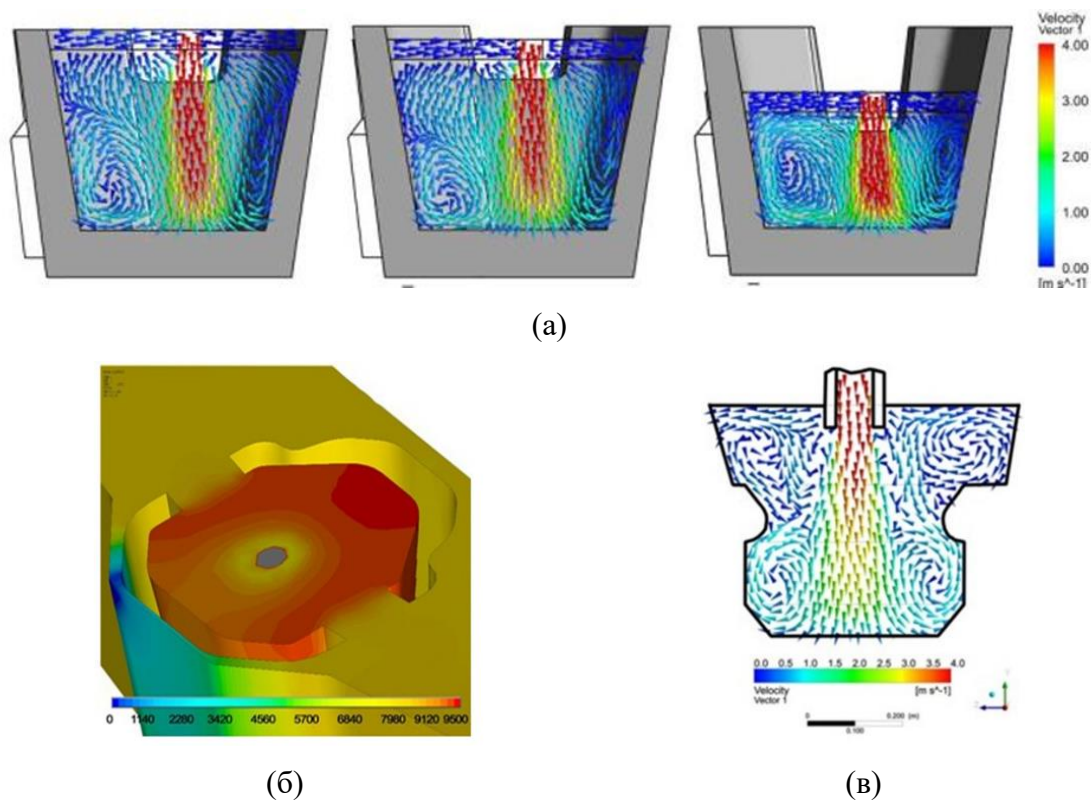


Рисунок 2. Моделювання процесу перемішування металу та шлаку в проміжному ковші (а), моделювання параметрів пристрою розподілу рідкого металу в проміжному ковші (б, в)

- вивчено процеси перемішування розплаву в промковші при використанні порогів, металоприймачів і перегородок з метою досягнення рафінуючого ефекту;
- розроблено пристрої прийому і розподілу рідкого металу в проміжному ковші для забезпечення розливання в умовах металургійного мікро-заводу (рис. 2, б, в);
- розроблено пристрої для рафінування розплаву з метою забезпечення розливання високоякісних сталей в умовах металургійних мікро-заводів.

Отже, на сьогоднішній день очевидна необхідність застосування методів чисельного моделювання. Зокрема, їх використання сприяє стимулюванню наукових стартапів на ранній стадії з обмеженим фінансуванням і ресурсами, оскільки за допомогою чисельного моделювання стає можливим швидко і економічне виконання інженерних проєктів, а також впровадження інноваційних рішень в промисловість України.

## СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ ДЛЯ ГАРЯЧОГО ДЕФОРМУВАННЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

**СИДОРЧУК О. М.**<sup>1, 2</sup>, к. т. н., старш. наук. співроб. відділу диспергування матеріалів та пластичної деформації прокати,

[sedoroleg@ukr.net](mailto:sedoroleg@ukr.net)

**ЄВИЧ Я. І.**<sup>1</sup>, к. ф-м. н., старш. наук. співроб. відділу фазових перетворень

**МИСЛИВЧЕНКО О. М.**<sup>1</sup>, к. т. н., наук. співроб. відділу фізичної хімії неорганічних матеріалів,

**МИРОНЮК Д. В.**<sup>1, 2</sup>, к. ф-м. н., старш. наук. співроб. відділу фізики і технології фотоелектронних та магнітоактивних матеріалів

**МИРОНЮК Л. А.**<sup>1, 2</sup>, к.х.н., наук. співроб. відділу фізики і технології фотоелектронних та магнітоактивних матеріалів

<sup>1</sup> *Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ*

<sup>2</sup> *Ningbo IPMS research and technology center Co., Ltd. No 218, Ningbo city, China*

Досліджена сталь відноситься до сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації для гарячого деформування мідного сплаву за температур експлуатації вище критичної точки  $A_3$  [1]. Для оптимізації режимів термічної обробки (гартування та відпуску) сталі 4X4H5M4Ф2 (без обробки кування), були проведені ряд експериментальних досліджень. Було встановлено, що найоптимальнішою температурою для гартування сталі є  $1100 \pm 5$  °С та відпуску  $590 \pm 5$  °С [2, 3]. В процесі гартування та відпуску при оптимальних режимах термічної обробки в роботі було проведено порівняння фазового стану між кованою сталлю 4X4H5M4Ф2 та сталлю (без обробки кування) того ж хімічного складу. Запропонований режим термічної обробки кованої сталі 4X4H5M4Ф2 дає змогу успішно експлуатувати штамповий інструмент для гарячого деформування міді за температури  $< 630$  °С (нижчої за критичну температуру  $A_1$  для цієї сталі). За підвищення робочої температури вище  $630$  °С в кованої сталі, обробленій за таким режимом термічної обробки, вуглець виділяється з мартенситу у вигляді ромбічного карбиду типу  $Me_7C_3$  з періодами ґратки  $a = 4,537$  Å;  $b = 6,892$  Å;  $c = 11,91$  Å, що супроводжується зниженням твердості (нижче 40 HRC за кімнатної температури) та міцності сталі [4]. Для гартованої сталі 4X4H5M4Ф2 (без обробки куванням) після відпуску за температури  $650$  °С, карбідна фаза типу  $Me_7C_3$  у структурі металу відсутня, що супроводжується підвищенню її теплостійкості до 40 HRC за кімнатної



температури, а це сприяє до підвищення експлуатації інструмента (матриці) для гарячого деформування міді. Незважаючи на те, що границя плинності при нагріванні дослідних зразків за температури відпуску 630-650 °С є заниженою. Використовувати матриці (сталі 4Х4Н5М4Ф2, без обробки кування), що піддається циклічним ударним навантаженням є недоцільним, оскільки ударна в'язкість становить у п'ять разів менше (35-36 Дж/см<sup>2</sup>), ніж кована (120-180 Дж/см<sup>2</sup>). І тому, рекомендовано використовувати сталі 4Х4Н5М4Ф2 (без обробки кування) для виготовлення матриць гарячого деформування міді лише в процесі екструзії без циклічних ударних навантажень.

Нагрів гартованої легованої конструкційної сталі (зокрема штампових сталей для гарячого деформування кольорових металів та сплавів) нижче критичної точки  $A_1$  на основі системи Fe-C при відпуску може призвести до відпускнуї крихкості у певному температурному інтервалі залежно від хімічного складу. В роботі були виявлені основні особливості кристалічної структури та фазового складу легованої конструкційної сталі 4Х4Н5М4Ф2 (без технології кування), що впливають на зміну її основних фізико-механічних властивостей після гартування 1100±5 °С та відпуску від 180 до 650 °С. В роботі було визначено, що максимальні високі значення параметра кристалічної ґратки «а» досягаються за температури відпуску 475 °С. Такі високі значення можна пояснити формуванням твердого розчину заміщення при утворенні фази системи Fe-Ni (хімічна формула Fe<sub>0,93</sub>Ni<sub>0,056</sub>), що може служити однією з причин зниження ударної в'язкості сталі при формуванні відпускнуї крихкості. [5]. В процесі нагріву гартованої сталі (без обробки кування) за температури 475 °С ударна в'язкість є вищою на 5 Дж/см<sup>2</sup> та границя плинності (при нагріву зразків) перевищує на 200 МПа у порівнянні з кованою сталлю того ж складу. Не зважаючи на те, що за однаковим показником твердості (50-52 HRC) та з перевищенням міцності (за кімнатної температури) до 200 МПа кованої дослідженої сталі у порівнянні зі сталлю (без обробки кування) того ж складу, більшу перевагу все ж таки має місце сталь без проведення термомодеформаційної обробки для виготовлення екструзійного штамп (матриці) для гарячого деформування кольорових металів та сплавів. Крім того, необхідно зауважити, що відпускуна крихкість дослідженої сталі знаходиться в інтервалі температур 450-500

°С і не співпадає до температури експлуатації екструзійного штампу (вище 450 °С) для гарячого деформування алюмінієвого сплаву.

### Список літератури:

- [1] Гогаєв К. О., Сидорчук О. М. Штампова сталь з регулюванням аустенітного перетворення для гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву // Наука і інновації – 18 (3). – 2022. – С.23-27.
- [2] Гогаєв К.О., Радченко О.К., Сидорчук О.М., Миронюк Д.В. Штампова сталь // Патент 141447 Україна, МПК С22С 38/00/ № u2019 09670; заявл. 05.09.2019; опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7.2020. – 2 с.
- [3] Сидорчук О.М., Миронюк Д.В., Радченко О.К., Гогаєв К.О., Хонггуанг Є. Підвищення теплостійкості та властивостей штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації // Металознавство та обробка металів. – № 2. – 2019. – С. 19-25.
- [4] Сидорчук О. М., Мисливченко О. М., Гогаєв К. О., Хонггуанг Є. Структура та властивості кованої сталі з регулюванням аустенітного перетворення, після термічної обробки та експлуатації коліс екструдерів для гарячого деформування міді // Фізико-хімічна механіка матеріалів – 2022 р. – № 1. – С. 112-118.
- [5] Биков О.І., Сидорчук О.М., Миронюк Л.А., Миронюк Д.В., Шведова Г.Л., Коновал В.П., Корічев С.Ф., Позній А.П. Рентгенівський аналіз особливостей формування кристалічної структури основних фаз та властивостей сталі 4Х4Н5М4Ф2 при відпуску // Металлофізика и новейшие технологии. – № 11. – 2021. – С. 1523-1536.

## ІННОВАЦІЙНИЙ МЕТОД ОДЕРЖАННЯ ЛИТИХ ТРИШАРОВИХ ВИРОБІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ДІЇ ВИСОКОЧАСТИТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

**ТИМОШЕНКО А. М.**, к. т. н., старш. наук. співроб. відділу концентрованих енергетичних впливів, [Marschal@i.ua](mailto:Marschal@i.ua)

**ШМАТКО О. В.**, м. н. с. відділу концентрованих енергетичних впливів  
*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, Україна*

В роботі розроблено метод та технологічні схеми ливарно-індукційного методу одержання тришарових виливків [1]. Метод, що розглядається в даній роботі, заснований на принципі заливання розплаву із залізовуглецевих сплавів на тверду тонкостінну сталеву заготовку попередньо нагріту до температури, яка забезпечує якісний зв'язок між цими матеріалами. Попередній нагрів заготовки відбувався в високочастотному електромагнітному полі з частотою 60 кГц та потужністю джерела живлення до 40 кВт.

В роботі представлено результати математичного моделювання розподілу полів температури при дії електромагнітних полів на сталеву заготовку. Встановлено основні закономірності зміни температури сталеві заготовки від сили струму і часу нагріву. Визначено технологічні параметри процесу нагріву та охолодження заготовки, а також заливки розплаву при одержанні тришарових виливків.

Проведено експериментальні дослідження з одержання надійного біметалевого з'єднання на основі залізовуглецевих сплавів «сталь-чавун». Здійснено вимірювання температури сталеві заготовки в різних її точках в залежності від сили струму індукційного джерела живлення. Вимірювання проводили за допомогою вольфрам-ренієвої термопари та перетворювача сигналу «Овен ТРМ 251» з записом показників на персональний комп'ютер.

Зіставлено результати фізичного та математичного моделювання температурних полів заготовки та отримана висока збіжність результатів (більше 95%).

На базі розробленої фізико-математичної моделі досліджено та описано вплив технологічних параметрів процесу одержання тришарових виробів

(температури заливки розплаву та температури заготовки) на формування якісного біметалевого з'єднання «сталь-чавун».

Проведено дослідження структурного складу та властивостей одержаних зразків на основі залізовуглецевих сплавів «сталь-чавун». Встановлено, що формування перехідних шарів у біметалевих зразках визначається процесами дифузії та фазових перетворень у зоні взаємодії «рідкий - твердий метал». Характер протікання цих процесів залежить від різних факторів насамперед температурних умов та хімічного складу біметалевих пар. Перехідний шар у біметалевих зразках «сталь 20 - чавун ЧХ16М2» характеризується наявністю двох зон. Перша зона з боку сталюї заготовки має перлітну структуру (дисперсність перліту Пд 0.3-0.5). Товщина цієї зони складає від 0,18 до 0,24 мм, розмір зерна 5 бал. При переході до сталюї заготовки відбувається поступове зміння перлітної структури на структуру, яка є характерною для сталі 20. Рекристалізоване зерно ферито-перлітної матриці сталі має 6 -7 бал. З іншого боку перша зона стикається з безкарбідною областю матриці чавуну. Друга зона помітно менше першої, її товщина знаходиться в межах від 0,02 до 0,04 мм. Мікротвердість на границі між першою та другою зоною перехідного шару становить від 260 до 528 кг/мм<sup>2</sup>. Чавун характеризується дендритною структурою. В міжосьових просторах дендритів розташовуються пластинчаті довжиною від 0,02 до 0,3 мм та більш дрібні (до 0,01 мм ) частки карбідів типу Me<sub>7</sub> C<sub>3</sub>. Твердість чавуну після термічної обробки (загартування з подальшим відпуском) складає 58-62 HRC.

#### Список літератури:

- [1] Тимошенко, А.М. Технологічні особливості комбінованого ливарно-індукційного методу одержання тришарових виливків / А.М. Тимошенко, В.П. Лихошва, О.В. Шматко, О.А. Пелікан, Р.Ф. Ліхацький // Процеси лиття. – 2022р. – №4. – С. 34-42.

## СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЇ В УКРАЇНІ ПІД ЧАС ПОВНОМАСШТАБНОГО ВТОРГНЕННЯ російської федерації

**ФОН ПРУСС М. А.**, аспірант, [m.fonpruss@gmail.com](mailto:m.fonpruss@gmail.com)

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ*

Незважаючи на те, що у сучасному світі на практиці усе частіше металеві вироби замінюються новими матеріалами (композити, наноматеріали, вироби з порошкової металургії та інше), метали та сплави на їх основі залишаються основними конструкційними матеріалами. Через це металургія залишається стратегічною сферою діяльності промисловості країн світу, яка виробляє сировину для машинобудування, транспортної та будівельної галузей промисловості [1]. При чому країни, що мають свою металургійну базу, є одними з найбільш промислово розвинених і процвітаючих у світі. Що ж стосується України, то наша вітчизняна металургія залишається однією з основних видів промислової діяльності, що робить її стратегічно важливою для майбутнього розвитку економіки [2]. Однак, є і негативні сторони: галузь відрізняється низьким рівнем екологічності виробництва, характеризується отриманням від'ємної або зовсім невисокої рентабельності операційної діяльності металургійних підприємств, низькими темпами зростання прямих іноземних інвестицій і слабкою інноваційною активністю [2]. Попри це, Україна має потужну промислову базу. До повномасштабної війни Україна була одним з найбільших постачальників сировини в Європі. Після повномасштабного вторгнення РФ металургія опинилася у найважчому стані серед інших галузей. Через порушення ланцюгів транспортування та поставок у нашій країні виникли серйозні проблеми з імпортом сировини та експортом готової продукції. Окрім цього війна завдала шкоди інфраструктурі виробничих потужностей. Більшість заводів опинилися біля лінії фронту або у самих гарячих точках. Це спричинило, що Україна втратила основні металургійні підприємства такі як «Азовсталь», ММК ім. Ілліча та ін. А у деяких областях призупинили роботу більшості з металургійних заводів або відновили роботу на новому місці. Це призвело до своєрідної фінансової напруги в країні: значно зросла собівартість на продукцію

через збільшення витрат на енергію та транспортування. Як результат це призвело до зниження попиту на металургійну продукцію. При чому такі ж проблеми спостерігаються і в Європі, де закрилося низка металургійних підприємств (через війну різко зросли ціни на електроенергію). Так як війна ще продовжується в Україні було зупинено великі проекти щодо інновації у сфері галузі металургії.

Проте, зараз металургія України починає відновлювати свою роботу та активно бореться з наявними викликами, що виникли через війну. Основним транспортуванням металургійної продукції були порти. Однак через руйнування портової інфраструктури та блокаду Чорного моря, ці морські маршрути залишаються недоступними [3]. Наразі українські металургійні підприємства через скасування мита перейшли на транспортуванням за рахунок залізниці, автотранспортом та баржами через дунайські порти [3]. Така зміна спричинила пошук нових потенційних клієнтів на нових ринках. Також багато вцілілі металургійних підприємств, що залишилися в Україні перепрофілювалися під нинішні військові потреби, які необхідні для захисту нашої землі та відвоювання тимчасово окупованих територій. Тому зараз підприємства відновлюють ділову активність у відносно безпечних регіонах (навіть у Харківській та Сумській областях) та після релокації виробничих потужностей [3]. А разом й з цим поступово відновлюється внутрішній попит для будівельної, машинобудівної галузей.

**Висновок.** Українська металургія через війну з РФ стикнулася з величезними труднощами. Проте вже зараз вже потроху спостерігається відновлення металургійної галузі. Основні гравці очікують подальше відновлення ділової активності та якнайшвидший старт відбудови та реконструкції України. Наразі, що першочергово необхідно забезпечити максимальне залучення міжнародних партнерів у питаннях стосовно інвестицій, транспортування та ринків збуту металопродукції.

#### Список літератури:

[1] Мельник, О. В. Тенденції та перспективи розвитку металургійних підприємств України / О. В. Мельник // Ефективна економіка. – 2017. – № 8. – Режим доступу : <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=762>

- [2] Нікіфірова, В. Економічний огляд металургійної галузі України [Електронний ресурс] / Віра Нікіфірова // Рейтинг, бізнес в офіціальних цифрах – Режим доступу : <https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-metalurhijnoi-haluzi-ukrainy/>
- [3] Стан української металургії під час війни // UkraineInvest – Режим доступу : <https://ukraineinvest.gov.ua/uk/news/22-06-22-3/>

## ПЕРСПЕКТИВИ УКРАЇНСЬКОГО ТИТАНУ ДЛЯ ВІТЧИЗНЯНОЇ ТА СВІТОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

**ШВАБ С. Л.**, к. т. н., старш. наук. співроб.,

[serg.schwab@gmail.com](mailto:serg.schwab@gmail.com)

*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ*

Україна є значним виробником титану і входить до 7 країн світу, де його видобувають. Кількість запасів українського ільменіту, з якого видобувають титан, становить 20 % від усіх світових запасів (Іршанське родовище). Також є значні поклади рутилу (діоксид титану ланцюжкової будови) у Придніпров'ї та на Волині.

Металічний титан та сплави на його основі застосовуються як конструкційний метал в авіаційній і ракетній техніці, суднобудівній, енергомашинобудівній, харчовій, медичній промисловості і кольоровій металургії, де вони надійно і тривало експлуатуються в багатьох хімічних агресивних середовищах в діапазоні температур від наднизьких до  $+(500—600)^{\circ}\text{C}$  і вище. Також завдяки своїм властивостям (висока питома міцність та корозійна стійкість) титан знайшов широке застосування при виробництві військової техніки – винищувачі, ракети, кораблі, танки, гаубиці та ін.

Міністерство внутрішніх справ США класифікувало титан як одну з 35 корисних копалин, життєво важливих для економіки та національної безпеки. Однак США, як і раніше, імпортують понад 90% своєї залізної руди, і не вся вона надходить з дружніх країн. Однак, США більше не зберігають титанову губку (первинний технічний продукт промислового виробництва титану) у своїх національних оборонних запасах, а останній виробник губчатого титану закритися у 2020 році. За даними Геологічної служби США, в минулому році Китай виробив понад 231 тисячу тонн титанової губки, що становить 57% світового виробництва. Далі йдуть Японія із 17% і Росія з 13%. Казахстан виробив майже 18 тисяч тонн, а Україна — понад 4 тисячі тонн.

Україна має великий потенціал як в отриманні металевого титану, так і в його впровадженні в якості деталей конструкцій як на власних теренах, так і на світовому ринку.



## **ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО 3D-ПРИНТИНГУ ТИТАНОВИХ ЗАГОТОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ БАЗОВОГО МАТЕРІАЛУ, ОТРИМАНОВОГО ШЛЯХОМ ГІДРУВАННЯ-ДЕГІДРУВАННЯ**

**ЯНГОЛЬ О. А.**, аспірант.,

[Samaly@bigmir.net](mailto:Samaly@bigmir.net)

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ*

Технологія електронно-променевого 3D принтингу (наплавка титанових сплавів), або іншими словами адитивне виробництво (АВ), на сьогоднішній день стоїть на передньому краї науки та техніки. Процес створення складних елементів різноманітних конструкції за рахунок виробництва, де САD модель вибудовується шляхом накладання послідовних шарів матеріалу за даними цифрового алгоритму, за допомогою електронного променя. АВ значно полегшує, прискорює та знижує собівартість виробу. Зниження витрат з використанням адитивної технології, пов'язаних з виготовленням абсолютно нестандартних об'єктів зі складною геометрією, які важко отримати за допомогою звичайних виробничих процесів.

Технологія дозволяє, використовуючи електронний пучок високої потужності, пошарово нарощувати металевий порошок у вакуумній камері і отримувати вироби високої щільності та міцності. Вироби, отримані за рахунок даної технології, майже не відрізняються від литих деталей за механічними властивостями.

На сьогоднішній день є запит на серійне впровадження електронно-променевого друку, з використанням матеріалу у вигляді порошкового металу, з заданими розміром гранул та властивостями. Оскільки широкого виробничого впровадження адитивне виробництво металевих виробів досі не досягнуто. [1]

Основними факторами розвитку даного напрямку є ціла низка причин, але завдяки високому попиту на титан та сплави на його основі у військових та цивільних споживчих цілях, особливо – авіа-космічне виробництво, а також використання у медицині для протезування, увага посилилась.

Таким чином враховуючи нагальні потреби України у збільшенні інноваційного промислового потенціалу, наприклад – у виробництві надлегких безпілотних літальних апаратів, чи елементів систем протезів, тощо, досить

високими темпами, доцільно впроваджувати 3D-принтери у серійне виробництво в закритому циклі на металургічних комбінатах, чи окремими виробничими потужностями, з огляду на досить високу екологічність виробництва та наднизьку відходність.

В якості матеріалів для 3D-друку найбільш широко застосовують металеві порошки. Найбільш ефективним способом отримання порошку з легованого титану губчастого є процес гідрування-дегідрування (HD). Даний процес дозволяє отримувати якісні дрібнодисперсні порошки титанових сплавів без привнесення металевих і газових домішок за рахунок виключення натирання робочих тіл при подрібненні, а також зниження температури подрібнення за рахунок високої крихкості гідридів.

Використання порошку гідрованого титану, забезпечує прискорене формування фаз і активацію спікання заготовок. Гідрований титан при нагріванні у вакуумі розпадається в інтервалі температур 300-900 °С з виділенням водню, це веде до утворення титану з високою щільністю дефектів кристалічної структури, що сприяє розвитку дифузійних процесів, які і визначають формування однорідного сплаву з високою щільністю. Атомарний водень, який виділяється при цьому, корисний для поліпшення кінетики спікання, відновлення оксидів і хлоридів, які, як правило, містяться на поверхнях порошкових частинок, і, таким чином, очищення часточок контактів. Це прискорює дифузію між компонентами порошкової суміші.

#### **Список літератури:**

[1] Ковальчук Д.В. Технологія xBeam 3D Metal printing на шляху до промислового виробництва /Д.В. Ковальчук, В.Г. Мельник, І.В. Мельник, Б.А. Тугай// Сучасна електрометалургія. 2020. – №3. – с. 30-34.

## CONTENTS

<b>Veis V. I., Parkhomchuk Zh. V., Kondratyuk S. Ye.</b> FEATURES OF GRADIENT STRUCTURES THE FORMATION IN STEEL CASTINGS.....	5
<b>Vodopijanova G. O., Turchanin M. A., Agraval P. G.</b> USING CALPHAD METHOD FOR PREDICTION OF AMORPHIZATION CONCENTRATION AREAS OF LIQUID ALLOYS IN Cu–Ni–Ti–Hf SYSTEM.....	8
<b>Voron M. M., Chat GPT</b> STRATEGIC ASPECTS OF UKRAINE INNOVATIVE INDUSTRY DEVELOPMENT .....	13
<b>Hnatenko M. O.</b> FEATURES OF PRODUCING AVIATION PARTS FROM NICKEL SUPERALLOYS BY PLASMA TRANSFERRED ARC PROCES .....	17
<b>Danyliak M.-O. M., Rizun Yu. Ya.</b> INHIBITORY EFFECT OF NATURAL POLYSACCHARIDE GUM ARABIC FOR CORROSION PROTECTION OF ALUMINUM ALLOYS .....	19
<b>Kaliuzhnyi P. B.</b> CURRENT TRENDS IN THE METAL CASTING INDUSTRY.....	23
<b>Kvasnytska K. H.</b> METHODS OF IMPROVING THE TECHNOLOGY FOR OBTAINING COMPLEX-PROFILE PARTS BASED ON MELTED MODELS.....	27
<b>Kedrovskiy S. M., Koval Yu. M., Slipchenko V. M., Slipchenko Vyach. M.</b> NEW METHODS OF MANUFACTURING SPATIAL STRUCTURES OF IMPLANTS FROM FUNCTIONAL MATERIALS .....	30
<b>Kyryliuk S.F., Kyryliuk Ye.S.</b> STUDY OF SYNTHESIZED ALUMOMATRIC COMPOSITES STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION .....	32
<b>Lavrys S. M., Shlyakhetka H. S., Danylyak O.-M. M.</b> CORROSION BEHAVIOR OF ADDITIVE MANUFACTURED TITANIUM ALLOYS IN HYDROCHLORIC ACID .....	35

<b>Likhatskyi R. F.</b> CHROME-ZIRCONIUM BRONZE PERSPECTIVES OF IMPLEMENTATION AS CONTACT PAIRS FOR ELECTRICAL TRANSPORT.....	38
<b>Manachyn I. O., Shevchenko A. P., Kislyakov V. G., Dvoskin B. V.</b> MODERNIZATION OF PREPARATION AND DESULFURIZATION PROCESSES IN LIQUID IRON WITH MAGNESIUM FOR CONVERTER SEPARATION.....	42
<b>Mohylko V. V., Burmak A. P., Voloshko S. M., Franchik N. V.</b> MODIFICATION OF VT6 ALLOY SURFACE LAYERS BY MECHANICAL HIGH-FREQUENCY IMPACTS.....	44
<b>Neima O. V.</b> APPLICATION OF POLYMER PATTERNS FOR THE MANUFACTURE OF CERAMIC MOLDS .....	49
<b>Semenko A. Yu., Goyda D. I.</b> USING OF NUMERICAL MODELING METHODS IN THE DEVELOPMENT OF CONTINUOUS (STAND) CASTING TECHNOLOGIES.....	52
<b>Sydorchuk O. M., Yevych Ya. I., Myslivchenko O. M., Myroniuk D. V., Myroniuk L. A.</b> STRUCTURE AND PROPERTIES OF STAMPED STEEL FOR HOT DEFORMATION OF NON-FERROUS METALS AND ALLOYS .....	55
<b>Tymoshenko A. M., Shmatko O. V.</b> INNOVATIVE METHOD OF PRODUCING CAST THREE-LAYER PRODUCTS USING THE EFFECT OF A HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD.....	58
<b>Fon Pruss M. A.</b> STATUS AND TRENDS OF METALLURGY DEVELOPMENT IN UKRAINE DURING russian FULL-SCALE INVASION .....	60
<b>Schwab S. L.</b> PROSPECTS OF UKRAINIAN TITANIUM FOR DOMESTIC AND GLOBAL INDUSTRY .....	63
<b>Iangol O. A.</b> IMPLEMENTATION OF ELECTRON-BEAM 3D PRINTING OF TITANIUM BILLETS USING BASE MATERIAL OBTAINED BY HYDRATION- DEHYDRATION.....	64