

алюмінію, борид алюмінію продовжує утворюватися, але замість карбїду алюмінію синтезується карбїд кремнію.

Література:

1. Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Болотова Л. К., Панфилов А. В., Панфилов А. А. Дисперсно упрочненные композиционные материалы, полученные в процессе реакционного литья // Международная конференция/ Структура и свойства материалов и покрытий для работы в экстремальных условиях / Кацевели, 2004. – С. 226-227.

**Волошко С.М.<sup>1</sup>, Бурмак А.П.<sup>1</sup>, Ворон М.М.<sup>1,2</sup>, Фурманюк Я.Г.<sup>1,2</sup>**

*(<sup>1</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського; <sup>2</sup>ФТІМС НАН України, Київ)*

**АНИЗОТРОПІЯ МІКРОСТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ  
INCONEL 718, ОТРИМАНОГО МЕТОДОМ SLM**

E-mail: [mykhailo.m.voron@gmail.com](mailto:mykhailo.m.voron@gmail.com)

Адитивні технології виробництва металевих виробів активно розвиваються у сучасному машинобудуванні, авіаційній та космічній техніці. Однією з найбільш перспективних технологій виготовлення деталей складної геометрії зі спеціальних сплавів є селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM). Цей метод дозволяє створювати деталі безпосередньо за цифровою моделлю шляхом пошарового сплавлення металевого порошку лазерним променем [1]. Використання цієї технології забезпечує значну економію матеріалу та дозволяє виготовляти складні конструкційні елементи, які неможливо отримати традиційними методами металургії.

Одним із матеріалів, що широко застосовується в адитивному виробництві, є жароміцний нікелевий жароміцний сплав Inconel 718, який характеризується високою міцністю, корозійною стійкістю та стабільністю властивостей при високих температурах [2]. Саме тому він широко використовується у виробництві елементів

газотурбінних двигунів, деталей енергетичних установок, а також у космічній техніці. Водночас специфіка процесу SLM призводить до формування складної за своїми параметрами мікроструктури та суттєвої анізотропії властивостей матеріалу, що пов'язано з особливостями теплових циклів під час пошарового формування виробів та як наслідок – специфічним фазоутворенням [3-5].

Виходячи з цього, існує потреба детального вивчення структурних особливостей сплаву Inconel 718, виготовленого методом SLM, а також визначення впливу мікроструктури на механічні властивості матеріалу. Таке розуміння закономірностей формування структури дозволить оптимізувати технологічні параметри друку та підвищити експлуатаційну надійність виробів. З огляду на це було проведено дослідження анізотропії мікроструктури, фазового складу та мікротвердості сплаву Inconel 718, отриманого методом селективного лазерного плавлення, а також виконано аналіз впливу структури на розподіл механічних властивостей у різних площинах зразків.

Для досягнення поставленої мети було застосовано комплекс експериментальних методів дослідження. Зокрема, використовувалися металографічний аналіз, сканувальна електронна мікроскопія, мікротвердометрія та рентгенівський фазовий аналіз. Такий підхід дозволив комплексно дослідити морфологію структурних складових, визначити фазовий склад матеріалу та оцінити рівень залишкових напружень.

Дослідження мікроструктури показали, що під час формування деталей методом SLM структура матеріалу формується внаслідок послідовної кристалізації окремих розплавлених ванн металу. У результаті формується характерна шарувата структура, що складається з перекривних зон плавлення. Така будова обумовлює формування витягнутих колоноподібних зерен, орієнтованих у напрямку тепловідведення. Встановлено, що мікроструктура сплаву Inconel 718, отриманого методом SLM, характеризується значною анізотропією, яка проявляється у різній морфології структурних складових у різних площинах дослідження. У поздовжній площині спостерігається витягнута колоноподібна структура зерен, тоді як у поперечній площині структура має більш дрібнодисперсний характер.

Важливим фактором формування мікроструктури є високі швидкості охолодження, які досягаються під час лазерного плавлення. У результаті формуються нерівноважні структурні стани, що відрізняються від отриманих традиційними методами лиття або деформаційної обробки. Такі умови сприяють утворенню дрібнодисперсних фазових складових та високій дислокаційній щільності.

Проведений рентгенофазовий аналіз показав, що основною структурною складовою сплаву є  $\gamma$ -фаза на основі нікелю, яка утворює матрицю матеріалу. Крім того, у структурі виявлено зміцнювальні фази  $\gamma'$  та  $\gamma''$ , що відіграють важливу роль у забезпеченні високих механічних властивостей сплаву. Також були виявлені карбідні частинки типу NbC, які утворюються внаслідок локальної сегрегації легувальних елементів під час кристалізації.

Дослідження мікротвердості показали значну нерівномірність її розподілу у різних напрямках відносно траєкторії друкування зразка. Значення мікротвердості можуть суттєво відрізнятися залежно від площини вимірювання, що підтверджує наявність структурної анізотропії матеріалу. Такий ефект пов'язаний із різною орієнтацією зерен, неоднорідним розподілом фаз та наявністю залишкових напружень.

Однією з причин анізотропії властивостей є специфічна текстура матеріалу, яка формується під час адитивного процесу. Напрямок теплового потоку під час кристалізації визначає орієнтацію росту зерен та сприяє формуванню текстурованої структури. Крім того, значний вплив мають повторні теплові цикли, які виникають під час нанесення наступних шарів матеріалу.

Встановлено, що на формування анізотропії також впливають залишкові напруження, які виникають у процесі швидкого локального нагрівання та охолодження матеріалу. Нерівномірний розподіл температурних полів призводить до появи внутрішніх напружень, що можуть змінюватися залежно від орієнтації шару та параметрів друку.

Таким чином, результати проведених досліджень показали, що структура сплаву Inconel 718, отриманого методом селективного лазерного плавлення, є

складною та характеризується вираженою анізотропією. Формування такої структури обумовлене особливостями адитивного процесу, зокрема послідовним формуванням шарів, високими швидкостями охолодження та повторними тепловими циклами.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості оптимізації параметрів адитивного виробництва для зменшення структурної анізотропії та підвищення однорідності властивостей матеріалу. Отримані дані можуть бути використані при розробленні технологічних режимів виготовлення відповідальних деталей із нікелевих жароміцних сплавів.

Проведене дослідження підтверджує перспективність застосування технології селективного лазерного плавлення для виготовлення деталей зі сплаву Inconel 718. Водночас для забезпечення стабільних експлуатаційних характеристик необхідно враховувати вплив структурної анізотропії та розробляти оптимальні режими термічної та технологічної обробки матеріалу.

#### Література:

1. Additive manufacturing of metallic materials: A review Zhang Y., Wu L., Guo X., Kane S., Deng Y., Jung Y.-G., Zhang J. Additive manufacturing of metallic materials: A review // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2018. – Vol. 27, No. 1. – P. 1–13. – DOI: 10.1007/s11665-017-2747-y.
2. Pröbstle M., Neumeier S., Hopfenmüller B., Püschel A., Freund L. P., Schmid M., Körner C., Göken M. Superior creep resistance of a nickel-based superalloy produced by selective laser melting // *Materials Science and Engineering A*. – 2016. – Vol. 674. – P. 299–307. – DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.019.
3. Selective laser melting of nickel-based superalloys DebRoy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // *Progress in Materials Science*. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

4. Amato K. N., Gaytan S. M., Murr L. E., Martinez E., Shindo P. W., Hernandez J., Collins S. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol. 60. – P. 2229–2239. – DOI: 10.1016/j.actamat.2011.12.032.

5. Review on Inconel 718 additive manufacturing Sames W. J., List F. A., Pannala S., Dehoff R. R., Babu S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *International Materials Reviews*. – 2016. – Vol. 61. – No. 5. – P. 315–360. – DOI: 10.1080/09506608.2015.1116649.

**Гнатуш В. А.**

*(незалежний аналітик, Київ)*

## **ТРЕНДИ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ: MEGA CASTING & GIGA CASTING**

**E-mail:** vgnatush@gmail.com

Активний розвиток глобального ринку електромобілів ініціював створення принципово нового варіанту технології лиття під тиском – мегалиття (Mega Casting & Giga Casting). Процес використовується для виготовлення великих конструктивних елементів автомобілів під високим тиском з високоміцних алюмінієвих сплавів без використання термічного оброблення. В результаті зменшується кількість деталей та скорочується процес складання автомобілів.

Виробниками надвеликих пресів для процесу мегалиття є компанії Bühler Group (Швейцарія), IDRA Group (Італія) та LK Machinery (Гонконг). Компанія Bühler Group виготовила свій перший мегапрес у 2020 р. і з того часу реалізувала споживачам понад 50 машин серії Carat. Мегапреси Bühler Group мають зусилля замикання прес-форм до 92 000 кН, а, наприклад, машина Carat 920 може впорскувати понад 200 кг рідкого алюмінієвого сплаву у прес-форму протягом мілісекунд [1].

Патент компанії Tesla Inc. (США) від 2018 р. [2] демонструє технічне рішення багатонаправленої ливарної машини (ливарний гігапрес) для виготовлення