

А. В. Кашенкова<sup>1,2</sup>, Н. Є. Калініна<sup>1</sup>, Є. О. Джур<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

<sup>2</sup> Державне підприємство «Південний машинобудівний завод ім. О. М. Макарова», Дніпро, Україна

## РОЗРОБКА ПОШАРОВОГО ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ ПОРШКОВИХ КОМПОЗИЦІЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

*Впровадження тривимірного друку — важливий етап у розвитку авіабудівної галузі. Адитивне виробництво розглядається як альтернатива фрезеруванню, штампуванню та литву. Використання 3D-принтерів і об'ємного сканування дозволить полегшити літальний апарат, а отже, скоротити витрати на паливо та матеріали.*

*Нержавіючу сталь використовують у всіх сферах діяльності людини, починаючи від харчової промисловості і закінчуючи електронікою і точною механікою. Сталь марки AISI 316 використовується у виробництві устаткування для хімічної промисловості, а також для виробництва виробів, що використовуються в агресивних середовищах, таких як, наприклад, морська вода холодних морів. Антикоровізійні властивості сталі 316L проявляються завдяки наявності на поверхні металу шару оксиду хрому. Цей захисний шар дуже стійкий, і навіть після механічного або хімічного пошкодження швидко набуває свого колишнього вигляду, а антикорозійні якості металу залишаються без змін.*

*Розроблено технологічний процес виготовлення заготовок з порошкового сплаву AISI 316L методом селективного лазерного спікання. У результаті проведених досліджень отримано зразки, досліджено структуру та механічні властивості сплаву, розроблено технологію термічної обробки заготовок. Запропоновано технологію термічної обробки заготовок, яка включає гомогенізацію при температурі 860 °С, гартування від температури 1050 °С і відпуск при температурі 510 °С, витримка 60 хв, охолодження на повітрі. Доведено, що 3D-друк може бути повноцінною заміною лиття по виплавлюваних моделях. Отримано високий комплекс механічних властивостей порошкових сплавів:  $\sigma_{\sigma} = 725$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 395$  МПа,  $\delta_5 = 42\%$ ,  $\Psi = 56\%$ ,  $KCU = 241$  Дж/см<sup>2</sup>.*

**Ключові слова:** 3D-друк, конструкційна сталь, лазер, модель, композиція.

Одним з найбільш перспективних напрямків розвитку ракетно-космічної техніки є розробка нових технологій швидкого виробництва виробів відповідального призначення [2]. Сутність подібних технологій полягає у пошаровій побудові виробів з порошкового матеріалу на основі САД-моделі, тривимірну геометрію якої описано у цифровому вигляді за допомогою програм твердотільного моделювання. На сьогодні існує цілий ряд технологій виробництва готових ви-

робів на основі різних методів спікання порошкових матеріалів. Метод селективного лазерного спікання, як і пошарове наплавлення, здійснюється в автоматичному режимі, і є більш швидким і економним.

У порівнянні з класичними методами, адитивний друк знімає виробничі обмеження — можна робити високоточні деталі без попередньої підготовки виробничої лінії, спрощуючи етап прототипування [1, 5, 8].

*Етапи селективного лазерного спікання (direct metal laser sintering — DMLS). Об'єкт формується*

з плавкого порошкового матеріалу (пластик, метал) шляхом його плавлення під дією лазерного випромінювання. Порошкоподібний матеріал наноситься на платформу тонким рівномірним шаром (зазвичай спеціальним валиком), після чого лазерне випромінювання формує на поверхні поточний шар об'єкта, що розробляється. Потім платформа опускається на товщину одного шару і на неї знову наноситься порошкоподібний матеріал. Для зменшення необхідної для спікання енергії температура робочої камери зазвичай підтримується на рівні трохи нижче від точки плавлення робочого матеріалу, а для запобігання окислення процес проходить в безкисневому середовищі.

Але в даний час низку принципів питань, що стосуються зв'язку структури і властивостей цих матеріалів, ще не досліджено [3, 4]. Зокрема недостатньо вивчено зв'язок мікроструктури матеріалу, яка отримується у процесі спікання, з його фізико-механічними характеристиками. У зв'язку з цим метою роботи є визначення режимів лазерного спікання, що забезпечують оптимальне співвідношення основних характеристик міцності і пластичності сталей, отриманих методами пошарового лазерного спікання.

У даній роботі представлено результати досліджень впливу режимів термічної обробки зразків після лазерного спікання зразків нержавіючої сталі AISI 316L на фізико-механічні властивості і структуру. Виготовлення зразків здійснюється послідовно, шар за шаром. Перший шар формується на поверхні спеціальної платформи. Наступні шари — на поверхні попереднього. Після спікання кожного шару платформа переміщується за допомогою крокового двигуна. Величина кроку (шару виробу) може вибиратися від 30 до 100 мкм. Для запобігання окислення і загоряння частинок порошку під час процесу виготовлення виробу робоча камера заповнюється аргоном. Для виготовлення деталі був обраний 3D-принтер типу SLM-500.

SLM Solutions SLM 500 HL — промислова установка для адитивного виробництва металевих виробів методом вибіркового лазерного спікання (рис. 1). SLM 500 HL має камеру великого розміру, що дозволяє створювати великогабаритні моделі розміром  $500 \times 280 \times 325$  мм. Плав-

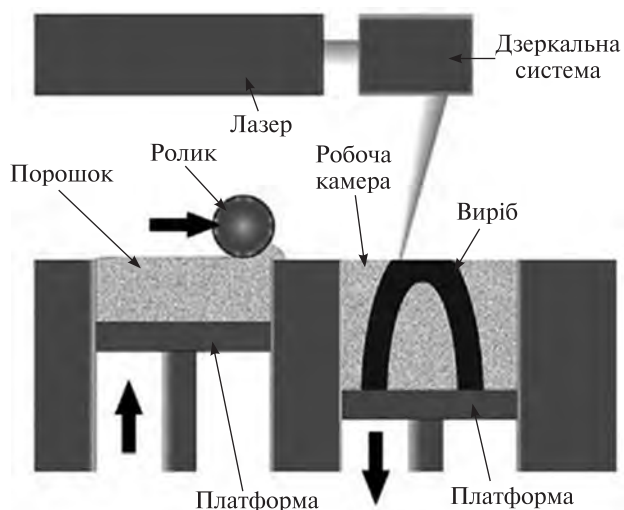


Рис. 1. Принципова схема роботи принтера SLM 500 HL

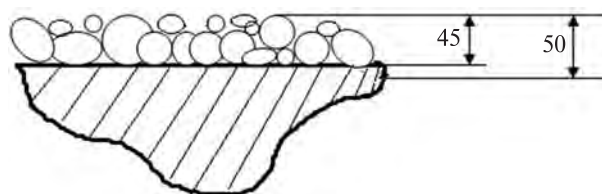


Рис. 2. Схема розподілу шарів у зоні побудови виробу, мкм

лення здійснюється двома лазерами потужністю 400 або 1000 Вт кожен, мінімальна товщина шару, що наноситься, дорівнює 20 мкм. В якості витратних матеріалів можна використовувати порошки з титану, алюмінію, нікелю, сталі та інших металів і сплавів [6, 7].

На відміну від лиття по моделях, що витоплюються, метод селективного лазерного спікання є найбільш технологічним. Це досягається за рахунок того, що 3D-принтер — це універсальний агрегат, на виході з нього отримуємо готову деталь, яка потребує лише фінішної механічної та термічної обробки. Технологія 3D-друку передбачає отримання деталі «вирослуванням» із великої кількості шарів, кожен з яких не перевищує  $45 \pm 2$  мкм, тому отримана деталь має високу щільність. Це можна пояснити наступним чином. Порошок сталі, з якого виготовляють деталь, має дисперсність  $42 \pm 5$  мкм, а глибина проплаву шару дорівнює  $50 \pm 5$  мкм (рис. 2).

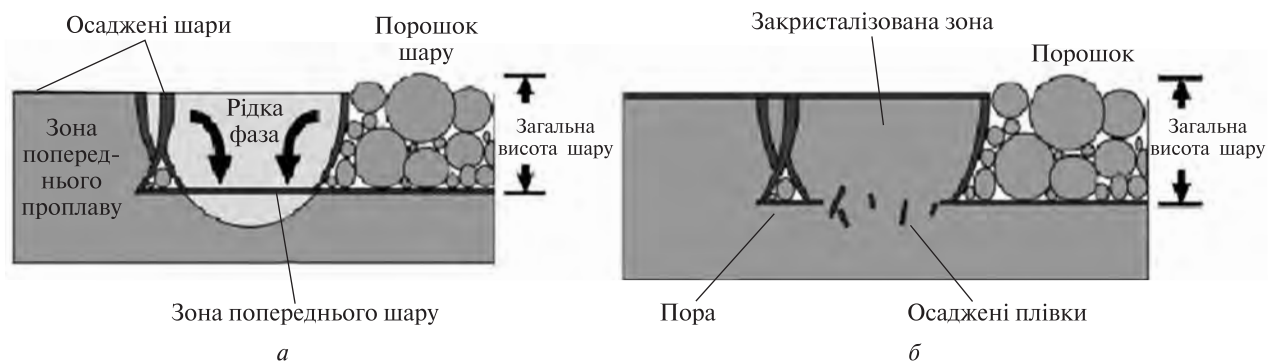


Рис. 3. Схема виникнення дефектів: а — у процесі одиночного кроку фокусу лазера, б — після кристалізації

Тобто, під час друку розплавлення проходить не тільки у шарі порошку, але й у зоні попереднього шару, і, як наслідок, шари спікаються один з одним. Висока щільність деталі пояснює відсутність таких поширених дефектів, як рихлості та усадочні раковини.

Мікроструктура та наявність дефектів одержаних виробів в основному залежать від технологічних параметрів процесу селективного лазерного спікання. Даний технологічний процес характеризується великою кількістю різних технологічних параметрів, та серед них можна виділити основні, які справляють найбільший вплив на кінцеву якість структури виробів. Це потужність лазерного джерела, швидкість сканування лазерного променя і стратегія обробки лазерним променем шарів виробу.

Механізм спікання шарів, при умові вибору правильного режиму та фракції порошку, дозволяє отримувати якісну структуру з 0.01 % мас. пор та інших дефектів. Пори, перекося та інші нещільності виникають лише у випадку недотримання технології спікання. Крім того, якщо задати занижку потужність лазера або крок фокуса лазера, то у структурі спостерігаються такі дефекти, як шаруватість, пори, непролави. Механізм виникнення плівок та пор зображено на рис. 3.

#### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження стала сталь 316L. Область застосування сталі 316L широка завдяки її опору корозії і окисленню, довговічності, високої міцності і пластичності. Вироби зі сталі 316L успішно використовуються не тільки в хімічній, нафтохі-

Таблиця 1. Хімічний склад сплаву 316L

Сплав	Вміст хімічних елементів, % мас.								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
316L	0.015	1.10	0.54	16.48	10.50	2.15	0.038	0.009	Осн.

Таблиця 2. Механічні властивості сплаву 316L

№№ зразків	Напрямок	Механічні властивості			
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %
1	Вертикально	598	500	54	64.6
2	«	630	509	51	67.9
3	Горизонтально	745	598	42.2	59.6
4	«	731	599	40.9	56.9

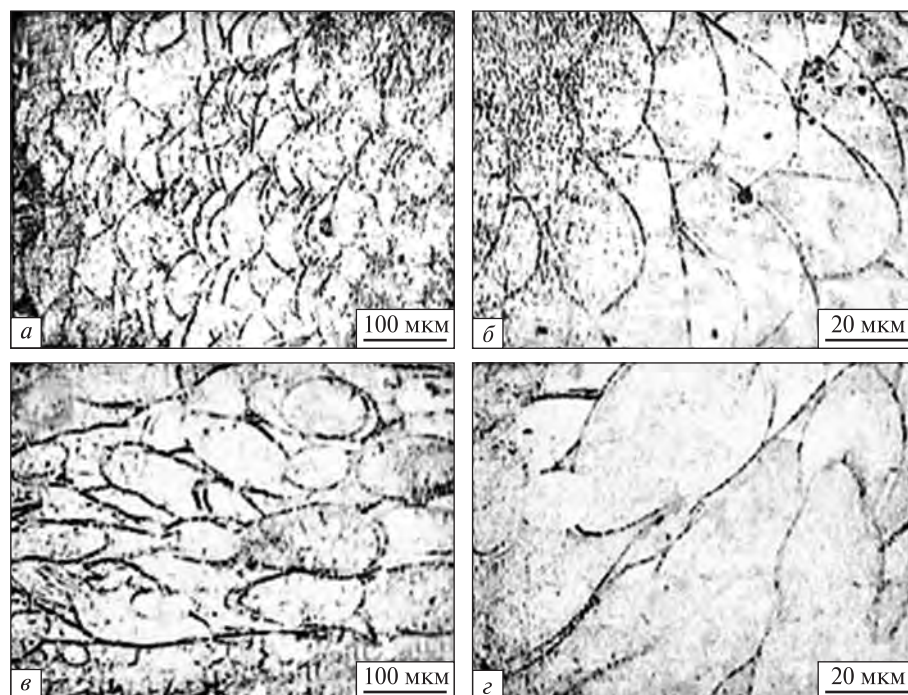


Рис. 4. Структура сплаву 316L: а, б — поперечний переріз, в, з — вздовж площини вирощування

мічний, гірничодобувній промисловості, а і у продовольчому та паперово-целюлозному секторах економіки. Особливе значення сталь 316L має для хірургії та ювелірного виробництва. З неї виготовляють медичні інструменти та ювелірні прикраси. Даний сплав прекрасно підходить для використання там, де необхідний максимальний захист від корозії, наприклад при виготовленні баків для корозійних розчинів, архітектурних споруд, що контактують з агресивними середовищами, труб для харчової промисловості і багато чого іншого.

Хімічний склад перевірявся спектральним методом. Результати аналізу приведені в табл. 1.

Механічні властивості визначалися по ГОСТ 1497 на циліндричних зразках. Результати механічних випробувань приведено в табл. 2.

З приведених даних виходить, що механічні властивості зразків №№ 1, 2 та №№ 3, 4 відрізняються: зразки № 3 та 4 більш міцні та менш пластичні, ніж зразки № 1, 2.

**Термічна обробка деталі зі сплаву 316L.** Перший режим термообробки — нагрівання при температурі  $940 \pm 10$  °С, витримка 25 хв, охолодження на повітрі; відпуск при температурі  $510 \pm 10$  °С, витримка 80 хв, охолодження на повітрі (режим І).

Таблиця 3. Механічні властивості сплаву після різних режимів термічної обробки

№ зразка	Напрямок вирощування	Режим термообробки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %
1	Горизонтально	Без т/о	649.0	580.0	35.0	57.0
3	«	І	711.7	401.1	38.0	53.5
5	«	ІІ	725.4	395.5	42.0	56.0
2	Вертикально	Без т/о	628.0	455.5	45.2	75.5
4	«	І	641.5	360.0	56.0	60.0
6	«	ІІ	693.3	355.4	56.0	63.0

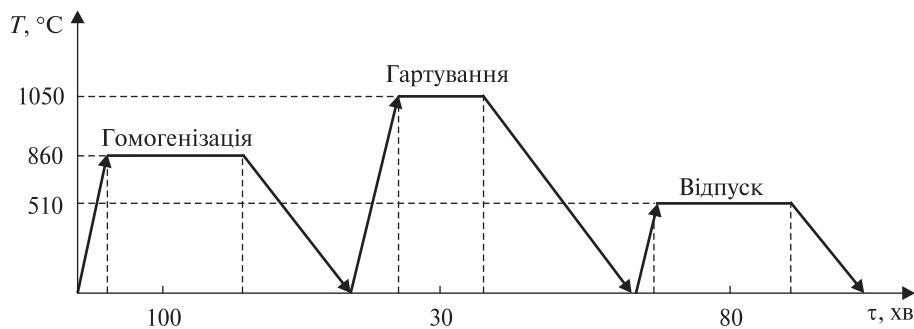


Рис. 5. Схема режиму термічної обробки

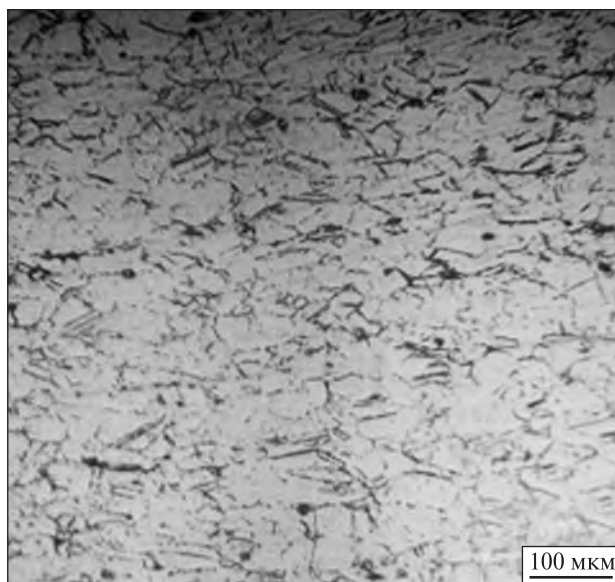


Рис. 6. Структура сплаву 316L після термічної обробки

Другий режим термообробки — нагрівання при температурі  $1230 \pm 10$  °С, витримка 25 хв, охолодження на повітрі; відпуск при температурі  $510 \pm 10$  °С, витримка 80 хв, охолодження на повітрі (режим II).

Для порівняння приведено механічні властивості сплаву без термічної обробки.

Після термічної обробки були проведені механічні випробування, результати яких приведені у табл. 3.

Вид мікроструктури зразків зображено на рис. 4. Дослідження проводилися на протравлених шліфах, виготовлених як уздовж, так і упоперек напрямку побудови зразків, за допомогою світлового лабораторного мікроскопа.

Зразки, оброблені по режиму I, зберегли вигляд формування структури, характерний для поздовжнього і поперечного перерізу, але втратили «дендритність». Так само виявлено хаотично розташовані, тонкі, звивисті і розгалужені мікротріщини довжиною до 0.18 мм

Після термічної обробки по режиму II структура у перерізі вздовж і упоперек напрямку побудови зразків стала практично однаковою, помітні рекристалізовані глобулярні зерна.

Наявність мікроструктурних тріщин показала, що обрані режими I і II не є оптимальними, тому було прийнято рішення про додаткові дослідження отриманих зразків. Випробування цих зразків проводилося за методикою, описаною вище, але з іншими режимами термообробки. Режими термообробки додаткових зразків (режим III):

- гомогенізація при температурі 860 °С, витримка 1 год 40 хв, охолодження на повітрі;
- гартування при температурі 1050 °С, витримка 30 хв, охолодження на повітрі;
- відпуск при температурі 510 °С, витримка 60...90 хв, охолодження на повітрі.

Після проведення кожного етапу термообробки проводилося мікродослідження шліфів: при перегляді мікроструктури після гомогенізації і загартування встановлено, що в них зберігся вид формування структури, характерний для поздовжнього і поперечного напрямку, і більш чітко проявилася кристалічна будова. Тріщин не виявлено.

Отже, рекомендовано саме III режим термічної обробки.

Режим термічної обробки представлено на рис. 5.

Структуру сплаву після термічної обробки показано на рис. 6.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено технологічний процес виготовлення заготовок порошкового сплаву AISI 316L методом селективного лазерного спікання.

2. Запропоновано технологію термічної обробки заготовок, яка включає гомогенізацію при температурі 860 °С, гартування від температури 1050 °С та відпуск при температурі 510 °С, витримка 60 хв, охолодження на повітрі.

3. В результаті 3D-друку отримано такий комплекс механічних властивостей сплаву AISI 316L:  $\sigma_B = 725$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 395$  МПа,  $\delta_5 = 42$  %,  $\Psi = 56$  %, КСУ = 241 Дж/см<sup>2</sup>.

4. В результаті проведених досліджень доведено, що 3D-друк може бути повноцінною заміною лиття за моделями, що витоплюються.

## ЛІТЕРАТУРА

- Багров В. В., Голованов И. В., Купринов Н. Л. и др. *Основы метода селективного лазерного спекания металл-полимерных порошковых композиций*. Москва: ФИАН-М, 1996, № 14. 19 с.
- Богуслаев В. А., Качан А. Я., Калинина Н. Е. и др. *Авиационно-космические материалы и технологии*. Запорожье, 2007. 383 с.
- Грязнов М. Ю., Шотин С. В., Чувильдеев В. Н. Эффект мезоструктурного упрочнения стали 316L при послойном лазерном сплавлении. *Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского*. 2012. Вып 5 (1). С. 3—50.
- Назаров А. П. Перспективы быстрого прототипирования методом селективного лазерного спекания / плавления. *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2011. Т. 1, № 4. С. 46—52.
- Смуров И. Ю., Мовчан И. А., Ядройцев И. А., Окунькова А. А., Цветкова Е. В., Черкасова Н. Ю. Аддитивное производство с помощью лазера. *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2011. Т. 2, № 4. С. 144—146.
- Шишковский И. В. Синтез функциональных изделий из градиентных материалов методом селективного лазерного спекания. *Перспективные материалы*. 2001. № 5. С. 60—64.
- Hugh Y. (2001). Rapid Prototyping Course. Version 1.0. URL: <http://claymore.Engineer.gvsu.edu/eod/manufact-302.htm/pgfld-510663> (дата звернення: 19.08.2019).
- Zinchenko V. P., Konotop D. I., Sidorenko A. P., Borisov V. V. Information technologies for modeling the layout of a complex technical object. *Information systems, mechanics and control*. 2011. № 6. P. 27—35.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018

## REFERENCES

- Bagrov V. V., Golovanov I. V., Kuprinov N. L. (1996). *Fundamentals of the method of selective laser sintering of metal-polymer powder compositions*. Preprint of FIAN-M, No. 14.
- Boguslaev B. A., Kachan A. Y., Kalinin N. E. (2007). *Aerospace materials and technologies*. Zaporozhye: Motor Sich.
- Gryaznov M. Y., Shotin S. V., Chuvildeev V. N. (2012). The effect of mesostructural hardening of 316L steel with layer-by-layer laser fusion. *Vestnik of the Nizhny Novgorod University named after Yu. N. I. Lobachevsky*, 5(1), 27—50.
- Nazarov A. P. (2011). Prospects for rapid prototyping using selective laser sintering / melting method. *Vestnik MSTU «Stankin»*, 1(4), 46—52.
- Smurov I. Y., Movchan I. A., Yadrojtsev I. A., Okun'kova A. A., Tsvetkova E. V., Cherkasova N. Yu. (2011). Additive production using a laser. *Vestnik MSTU «Stankin»*, 2(4), 144—146.
- Shishkovsky I. V. (2001). Synthesis of functional products from gradient materials by the method of selective laser sintering. *Perspective materials*, No. 5, 60—64.
- Hugh Y. (2001). Rapid Prototyping Course. Version 1.0. URL: <http://claymore.Engineer.gvsu.edu/eod/manufact-302.htm/pgfld-510663> (Last accessed: 19.08.2019).
- Zinchenko V. P., Konotop D. I., Sidorenko A. P., Borisov V. V. (2011). Information technologies for modeling the layout of a complex technical object. *Information systems, mechanics and control*, No. 6, 27—35.

Received 18.06.2018

А. В. Кашенкова<sup>1,2</sup>, Н. Е. Калинина<sup>1</sup>, Е. А. Джур<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

<sup>2</sup> Государственное предприятие «Южный машиностроительный завод имени А. М. Макарова», Дніпро, Україна

#### РАЗРАБОТКА ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Внедрение трехмерной печати — важный этап в развитии авиастроительной отрасли. Аддитивное производство рассматривается как альтернатива фрезерованию, штамповке и литью. Использование 3D-принтеров и объемного сканирования позволит облегчить летательный аппарат, а значит, сократить расходы на топливо и материалы. Нержавеющую сталь используют во всех сферах деятельности человека, начиная от пищевой промышленности и заканчивая электроникой и точной механикой. Сталь марки AISI 316 используется в производстве оборудования для химической промышленности, а также для производства изделий, используемых в агрессивных средах, таких как, например, морская вода холодных морей. Антикоррозийные свойства стали 316L проявляются благодаря наличию на поверхности металла слоя окси-

да хрома. Этот защитный слой очень устойчив, и даже после механического или химического повреждения быстро приобретает свой прежний вид, а антикоррозийные качества металла остаются без изменений.

Разработан технологический процесс изготовления заготовок из порошкового сплава AISI 316L методом селективного лазерного спекания. В результате проведенных исследований получены образцы, исследованы структура и механические свойства сплава, разработана технология термической обработки заготовок. Предложена технология термической обработки заготовок, которая включает гомогенизацию при температуре 860 °С, закалки от температуры 1050 °С и отпуск при температуре 510 °С, выдержка 60 мин, охлаждение на воздухе. Доказано, что 3D-печать может быть полноценной заменой литья по выплавляемым моделям. Получен высокий комплекс механических свойств порошковых сплавов:  $\sigma_B = 725$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 395$  МПа,  $\delta_5 = 42\%$ ,  $\Psi = 56\%$ ,  $KCU = 241$  Дж/см<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** 3D-печать, конструкционная сталь, лазер, модель, композиция.

АА. V. Kashenkova<sup>1,2</sup>, N. Ye. Kalinina<sup>1</sup>, Ye. O. Dzhur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup> SE «PA Yuzhny Machine-Building Plant named after A. Makarov», Dnipro, Ukraine

#### DEVELOPMENT OF SELECTIVE LASER SINTERING OF POWDER COMPOSITIONS OF CONSTRUCTIONAL STEELS

Three-dimensional printing implementation is an important stage in the progress of the aircraft industry. The ad-

ditive production is considered as an alternative to milling, stamping, and casting. The use of 3D printers and bulk scanning will lighten the design of an aircraft and thus reduce fuel and material costs. Stainless steel is used in all spheres of human activity from the food industry to electronics and precision mechanics. AISI 316 steel is used in the manufacture of equipment for the chemical industry as well as for the manufacture of products used in aggressive environments, such as, for example, seawater in cold seas.

The anticorrosion properties of 316L steel are manifested due to the presence of a layer of chromium oxide on the metal surface. This protective layer is very stable, and even after mechanical or chemical damage, it quickly takes its former form, and the anticorrosive properties of the metal remain unchanged.

The technological process has been developed for the manufacture of billets from AISI 316L powder alloy by selective laser sintering. The workpiece heat treatment technology is proposed, which includes homogenization at 860 °С, tempering from 1050 °С, and tempering at 510 °С for 60 min, cooling in air. As a result, specimens were obtained, the structure and mechanical properties of the alloy were investigated, and the technology of thermal processing of billets was developed. It has been proven that 3D-printing can be a full replacement of investment casting. A high set of mechanical properties of powder alloys has been obtained:  $\sigma_v = 725$  МПа,  $\delta_5 = 42\%$ ,  $\Psi = 56\%$ ,  $KCU = 241$  J/cm<sup>2</sup>.

**Keywords:** 3D-printing, construction steel, laser, model, composition.