

УДК 669-1:51-74:519.257

DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240418.30.102

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ AISi 316L, ОТРИМАНОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ ПОРОШКОВИХ КОМПОНЕНТІВ

КАЛІНІН О. В.^{1*}, к. т. н., докторант,
КАШЕНКОВА А. В.², магістр, інженер

^{1*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (068) 357-95-35, e-mail: kalinin.duep@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3597-158X

² Кафедра технології виробництва, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, Дніпро, 49010, Україна, ORCID 0000-0002-9031-9335

Анотація. *Мета дослідження* – розроблення технології виготовлення деталей відповідального призначення методом адитивної технології. *Методика.* Заготовки одержано методами порошкового друку на 3D-принтері SLM–500. *Результати.* Обрано та обгрунтовано матеріал, з якого виготовлено деталь "крильчатка" виходячи з умов експлуатації та призначення деталі. Сплав 316L належить до класу корозійностійких криогенних сталей і застосовується головним чином як матеріал для деталей, що працюють в інтервалі температур від –100 °С до +350 °С і умовах значних напружень. Виходячи з типу виробництва, розмірів та конфігурації деталі запропоновано найбільш раціональний метод її отримання, а саме метод селективного лазерного спікання. Розроблено технологічний процес виготовлення деталі типу «крильчатка»: отримання заготовки методом селективного лазерного спікання, термічної обробки та контроль якості готового виробу. Запропоновано режим термічної обробки після друку виробу. *Наукова новизна.* Встановлено закономірності анізотропії механічних властивостей залежно від напрямку виготовлення деталі методом адитивної технології. *Практична значимість.* Отримані результати використані на машинобудівному підприємстві для підвищення механічних і експлуатаційних властивостей сплаву для газотурбінного двигуна.

Ключові слова: сплав; механічні властивості; структура; адитивна технологія; порошкова металургія

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА AISi 316L, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

КАЛИНИН А. В.^{1*}, к. т. н., докторант,
КАШЕНКОВА А. В.², магістр, інженер

^{1*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднeпpовская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днeпpо, 49600, Украина, тел. +38 (068) 357-95-35, e-mail: kalinin.duep@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3597-158X

² Кафедра технологии производства, Днeпpовский национальный университет имени Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, Днeпpо, 49010, Украина, ORCID 0000-0002-9031-9335

Аннотация. *Цель исследования* – разработка технологии изготовления деталей ответственного назначения методом адитивной технологии. *Методика.* Заготовки получены методами порошковой печати на 3D-принтере SLM–500. *Результаты.* Выбран и обоснован материал, из которого изготовлена деталь "крыльчатка", исходя из условий эксплуатации и назначения детали. Сплав 316L относится к классу стойких криогенных сталей и применяется, главным образом, в качестве материала для деталей, работающих в интервале температур от –100 °С до +350 °С и в условиях значительных напряжений. Исходя из типа производства, размеров и конфигурации детали предложен наиболее рациональный метод ее получения, а именно метод селективного лазерного спекания. Разработан технологический процесс изготовления детали типа «крыльчатка»: получение заготовки методом селективного лазерного спекания, термической обработки, и контроль качества готового изделия. Предложен режим термической обработки после печати изделия. *Научная новизна.* Установлены закономерности анизотропии механических свойств в зависимости от направления изготовления детали методом адитивной технологии. *Практическая значимость.* Полученные результаты использованы на машиностроительном предприятии для повышения механических и эксплуатационных свойств сплава для газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: сплав; механические свойства; структура; адитивная технология; порошковая металлургия

RESEARCH OF STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF AISi 316L ALLOY OBTAINED BY SELECTIVE LASER SURFACTION OF POWDER COMPONENTS

KALININ A.V.^{1*}, *Ph. D., Ass. Prof.*,
KASHENKOVA A.V.², *Master, engineer*

^{1*} Department of materials science and materials processing, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel.: +38 (068) 357-95-35, e-mail: kalinin.duep@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3597-158X

² Oles Honchar Dnipro National University, Department of Production Technology, 72, Gagarina ave., Dnipro, 49010, Ukraine, ORCID 0000-0002-9031-9335

Abstract. Purpose. Development of technology for manufacturing parts of responsible designation by the method of additive technology. **Methodology.** The billets were obtained by the methods of powder printing on the 3D printer SLM-500. **Findings.** The material from which the "impeller" part is made based on the conditions of operation and the purpose of the part is selected and substantiated. Spread 316L belongs to a class of corrosion-resistant cryogenic steels and is used mainly as a material of parts working in the temperature range from -100 °C to + 350 °C and in conditions of significant stresses. Based on the type of production, size and configuration of the parts, the most rational method for obtaining it, namely the method of selective laser sintering, was proposed. The technological process of manufacturing a part of the type "impeller" is developed: the receipt of the billet by the method of selective laser sintering, heat treatment, and quality control of the finished product. The thermal treatment mode is proposed after the product is printed. **Originality.** The regularities of anisotropy of mechanical properties depending on the direction of manufacturing the part by the method of the additive technology are established. **Practical value.** The obtained results were used at the machine-building enterprise to increase the mechanical and operational properties of the alloy for the gas turbine engine.

Keywords: alloy; mechanical properties; structure; additive technology; powder metallurgy

Вступ

Один із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасного матеріалознавства – це розроблення нових технологій швидкого одержання виробів відповідального призначення [1]. Сутність подібних технологій полягає в пошаровій побудові виробів із порошкового матеріалу на основі CAD-моделі – моделі, тривимірна геометрія якої описана в цифровому вигляді за допомогою програм твердотілого моделювання [2–4]. Наразі існує ціла низка технологій виробництва готових виробів на основі різних методів спікання порошкових матеріалів.

Селективне лазерне спікання, як і пошарове наплавлення, здійснюється в автоматичному режимі, будучи більш швидким і економічним.

Порівняно з класичними методами точного лиття, адитивний друк знімає виробничі обмеження – можна виготовляти високоточні запчастини без попередньої підготовки виробничої лінії, спрощуючи етап прототипування [5].

Матеріал

Сплав AISi 316L належить до неіржавіючих сталей аустенітного класу. Маркування 316L відповідає низьковуглецевому аналогу сталі.

Область застосування сталі 316L широка завдяки її опору корозії і окисненню, довговічності, високій міцності і пластичності. Вироби зі сталі 316L успішно використовуються не тільки в хімічній, нафтохімічній, гірничодобувній промисловості, а й у

продовольчому та паперово-целюлозному секторах економіки.

Результати аналізу хімічного складу перевірено аналітичним та спектральним методами, результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву AISi 316L / Chemical composition of the AISi 316L alloy

Сплав	Вміст хімічних елементів, % мас.						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
AISI 316L (аналог <u>03X16H15M3</u>)	0,015	1,10	0,54	16,48	10,50	2,15	Ост.

Методика і результати

Механічні випробування виливки проводять із метою перевірки відповідності її механічних властивостей вимогам технічних умов. Зразки для випробувань на розтяг та ударну в'язкість брали із заготовок, які спеціально виготовляли у принтері одночасно з деталями. При цьому вони проходили всі етапи термічної обробки.

Механічні властивості визначалися за ГОСТ 1497-84 на циліндричних зразках. Результати механічних випробувань наведено в таблиці 2.

Із наведених даних виходить, що механічним властивостям сталі присутня анізотропія механічних властивостей, аналогічно структурі деформованих полуфабрикатів – прутків, листів і плит. Найвищий

ступінь анізотропії має місце з межі міцності ($K_z = 1.25$).

Таблиця 2

**Механічні властивості сплаву 316L /
Mechanical properties of 316L alloy**

№ №	Напрямок	Механічні властивості			
		$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Ψ , %
1	Вертик.	598	500	54,0	64,6
2	Вертик.	630	509	51,0	67,9
3	Гориз.	745	598	42,2	59,6
4	Гориз.	731	599	40,9	56,9

Досліджували різні режими термічної обробки зразків:

Режим I – існуючий режим: відпал 500 °С, гартування від 980 °С;

Режим II – запропонований режим: гомогенізація, гартування, відпуск.

Мікроструктуру зразків зображено на рисунку 1. Дослідження проводилися на шліфах, виготовлених як уздовж, так і поперек напрямку побудови зразків.

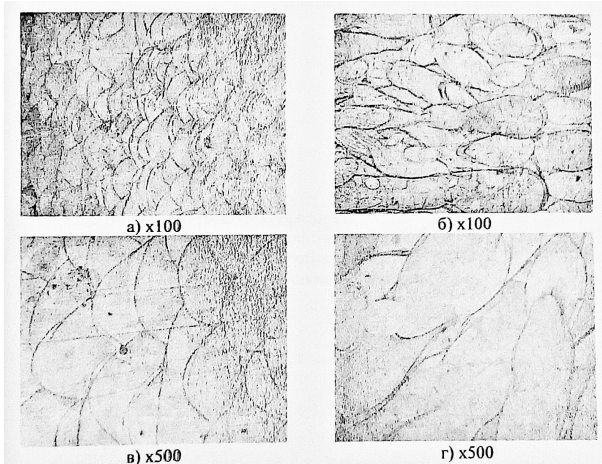


Рис 1. Мікроструктура сплаву 316L :
а, в – поперечний переріз;

б, г – вздовж площини вирощування /

Fig. 1. The microstructure of the 316L alloy :

а, в – cross-section; б, г – along the growing plane

Зразки, оброблені за режимом I, зберегли вигляд формування структури, характерний для подовжного і поперечного перерізу, але втратили дендритність. Крім того, виявлено хаотично розташовані тонкі, звивисті і розгалужені мікротріщини довжиною до 0,18 мм.

Після термічної обробки за режимом II структура в перерізі вздовж і поперек напрямку побудови зразків стала практично однаковою, помітні рекристалізовані глобулярні зерна.

Наявність мікротріщин у структурі зразків показала, що режим термічної обробки I не оптимальний, тому було прийнято рішення про додаткові дослідження під час пуско-налагоджувальних робіт. Випробування цих зразків проводилося за аналогічною методикою, але з іншим режимом термічної обробки.

Рекомендовано II режим термічної обробки [6]:

– **гомогенізація** за температури 860 °С, витримка 1 год. 40 хв, спресне охолодження на повітрі;

– **гартування** від температури 1 050 °С, витримка 30 хв, спресне охолодження;

– **відпуск** за температури 510 °С, витримка 60 хв, охолодження на повітрі.

Режим термічної обробки показано на рисунку 2.

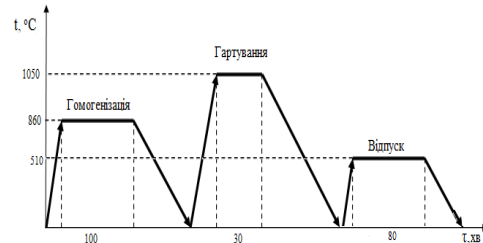


Рис. 2. Схема запропонованого режиму термічної обробки / Fig. 2. The scheme of the proposed thermal treatment

Мікроструктуру сплаву після термічної обробки за режимом II наведено на рисунку 3.

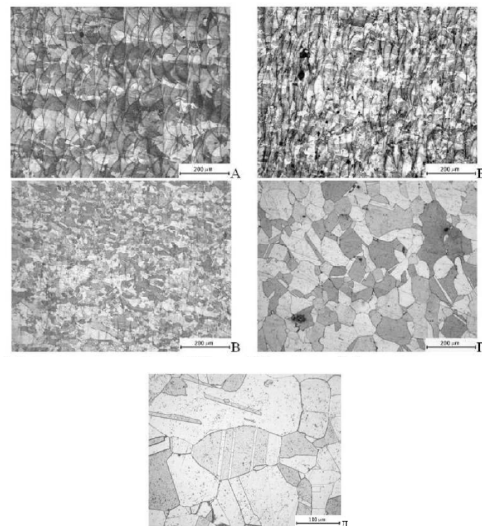


Рис. 3. Структура зразків сталі 316L $\times 100$:
а – без ТО; б – відпал 500 °С; в – гартування 980 °С;
г – гомогенізація 860 °С, гартування 1 050 °С,
відпуск 510 °С; д – литий сплав / Fig. 3. Structure of
steel samples 316L $\times 100$: а – without TT; б – annealing
500 °С; в – hardening 980 °С; г – homogenization
at 860 °С, quenching 1 050 °С, release 510 °С;
д – lithium alloy

Наукова новизна та практична значимість

Установлено закономірності анізотропії механічних властивостей залежно від напрямку виготовлення деталі методом адитивної технології, а також надано рекомендації.

Отримані результати використані на машинобудівному підприємстві для підвищення механічних і експлуатаційних властивостей сплаву для гзотурбінного двигуна.

Висновки

1. Обрано та обґрунтовано матеріал, з якого виготовлено деталь «крильчатка» виходячи з умов експлуатації та призначення деталі. Сплав 316L належить до класу корозійностійких криогенних сталей і застосовується головним чином як матеріал для деталей, що працюють в інтервалі температур від $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$ і в умовах значних напружень.

2. Виходячи з типу виробництва, розмірів та конфігурації деталі запропоновано найбільш раціональний метод її отримання, а саме метод селективного лазерного спікання.

3. Запропоновано режим термічної обробки:
– гомогенізація за $860\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка 1 год. 40 хв, спрєсне охолодження на повітрі;
– гартування від $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка 30 хв, спрєсне охолодження на повітрі;
– відпуск за $510\text{ }^{\circ}\text{C}$ витримка 60...90 хв, охолодження на повітрі.

4. В результаті 3D друку отримано такий комплекс механічних властивостей сплаву 316L: $\sigma_b = 725,4\text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 395,5\text{ МПа}$, $\delta_5 = 42,0\%$, $\Psi = 56,0\%$, $KCU = 241\text{ Дж/см}^2$, що перевищує рівень властивостей сплаву, отриманого методом точного лиття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авиационно-космические материалы и технологии : учебник / [В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, Н. Е. Калинина и др.]. – Запорожье : Мотор Сич, 2007. – 383 с.
2. Смулов И. Ю. Аддитивное производство с помощью лазера / И. Ю. Смулов, И. А. Мовчан, И. А. Ядройцев, А. А. Окунькова, Е. В. Цветкова, Н. Ю. Черкасова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – Т. 2. – № 4. – С. 144–146.
3. Назаров А. П. Перспективы быстрого прототипирования методом селективного лазерного спекания / плавления / А. П. Назаров // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – Т. 1. – № 4. – С. 46–52.
4. Аддитивные технологии в машиностроении : пособ. для инж. / [М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш]. – Москва : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 219 с.
5. Грязнов М. Ю. Эффект мезоструктурного упрочнения стали 316L при послойном лазерном сплавлении / М. Ю. Грязнов, С. В. Шотин, В. Н. Чувильдеев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2012. – Вып. 5 (1). – С. 33–50.
6. Калініна Н. Є. Метод селективного лазерного спікання як альтернатива точному литтю / Н. Є. Калініна, А. В. Кашенкова // Збірник тез IV Всеукраїнського форуму студентів, аспірантів і молодих учених. – Дніпро, 2017. – С. 23–25.

REFERENCES

1. Boguslaev B.A., Kachan A.Ya., Kalinin N.Ye. and oth. *Aviacionno-kosmicheskie materialy i tehnologii* [Aerospace materials and technologies]. Zaporozhye : Motor Sich, 2007, 383 p. (in Russian).
2. Smurov I.Yu., Movchan I.A., Yadrojtsev I.A., Okun'kova A.A., Tsvetkova E.V. and Cherkasova N.Yu. *Additivnoe proizvodstvo s pomosh'yu lazera* [Additive production using a laser]. *Vestnik MGTU "Stankin"* [Bulletin of Moscow State Technical University "Stankin"]. 2011, vol. 2, no. 4, pp. 144–146. (in Russian).
3. Nazarov A.P. *Perspektivy bystrogo prototipirovaniya metodom selektivnogo lazernogo spekaniya / plavleniya* [Prospects for rapid prototyping using selective laser sintering / melting method]. *Vestnik MGTU "Stankin"*. [Bulletin of Moscow State Technical University "Stankin"]. 2011, vol. 1, no. 4, pp. 46–52. (in Russian).
4. Zlenko M.A. and Nagaitsev M.V. *Additivnye tehnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Moscow : GNC RF FGUP «NAMI», 2015, 219 p. (in Russian).
5. Gryaznov M.Yu., Shotin S.V. and Chuvil'deev V.N. *Effekt mezostrukturnogo uprochneniya stali 316L pri poslojnom lazernom splavlenii* [The effect of mesostructural hardening of 316L steel layered laser fusion]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University after N.I. Lobachevsky]. 2012, iss. 5 (1), pp. 4–50. (in Russian).
6. Kalinina N.Ye. and Kashenkova A.V. *Metod selektivnogo lazernogo spikannya yak al'ternativa tochnomu littyu* [The method of selective laser spikannya yak alternative to an exact liter]. *Zbirnik tez IV Vseukraїns'kogo forumu studentiv, aspirantiv i molodih uchenih* [Collection of theses of the IV All-Ukrainian Forum of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Dnipro, 2017, pp. 23–25. (in Ukrainian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. С. Вахрушевою (Україна), д-ром техн. наук, проф. Д. В. Лаухіним (Україна).

Надійшла до редакції 22.03.2018

Прийнята до друку 28.03.2018