

Исследование структуры и свойств образцов из жаропрочного сплава Inconel 738, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM)

© 2020

Дмитриева Мария Олеговна^{*1,3}, студент
Мельников Алексей Александрович^{1,4}, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения
Головач Андрей Максимович^{1,5}, студент
Бондарева Ольга Сергеевна^{1,6}, кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения
Смелов Виталий Геннадиевич^{1,2,7}, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологий производства двигателей, старший научный сотрудник ИПИТ-216
Сотов Антон Владимирович^{1,2,8}, кандидат технических наук,
ассистент кафедры технологий производства двигателей, младший научный сотрудник ИПИТ-216
Агаповичев Антон Васильевич^{1,9}, ассистент кафедры технологий производства двигателей,
младший научный сотрудник ИПИТ-216

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара (Россия)

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва (Россия)

*E-mail: mdmitr1ewa@yandex.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4874-9278>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1953-3670>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1329-3001>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4273-2483>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9556-6290>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

⁹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0042-7333>

Аннотация: Метод селективного лазерного сплавления (SLM) с применением порошковых металлических материалов в настоящее время является перспективным направлением в авиа- и двигателестроении. Благодаря этому методу возможно производство деталей с конфигурацией любой сложности при меньших затратах на оснастку и дополнительную механическую обработку, упрощается также прототипирование изделий. Особенно актуальным является вопрос применения в аддитивном производстве порошковых материалов из жаропрочных сплавов, что обусловлено проблемами, вызванными их сложным химическим составом, недостаточной теплопроводностью и склонностью к усадке. Работа посвящена изучению влияния мощности лазерного излучения на микроструктуру и свойства образцов из жаропрочного никелевого сплава Inconel 738, полученных с помощью промышленного 3D-принтера по технологии печати SLM. Дополнительно рассмотрен способ повышения механических свойств образцов за счет улучшения микроструктуры после SLM и последующей термической обработки. Проведены металлографические и электронно-микроскопические исследования исходного материала и образцов, выращенных по технологии SLM при мощности лазерного излучения 75, 100, 125 и 325 Вт. Проанализирована эволюция микроструктуры в результате нагрева, обусловленного ростом подводимой энергии. Последующая термообработка позволила исследовать влияние ступенчатой закалки на микроструктуру и механические свойства образцов. Определены оптимальные технологические параметры лазерного излучения для изготовления деталей методом SLM из жаропрочного сплава Inconel 738. Получено изделие с минимальным количеством дефектов. Установлено, что термическая обработка, включающая в себя ступенчатую закалку, повышает механические свойства – предел прочности, предел текучести и относительное удлинение за счет «залечивания» и уменьшения размера дефектов.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав; микроструктура; селективное лазерное сплавление; электронная микроскопия; Inconel 738.

Благодарности: Статья подготовлена по материалам докладов участников IX Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2019) с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 9–13 сентября 2019 года.

Для цитирования: Дмитриева М.О., Мельников А.А., Головач А.М., Бондарева О.С., Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В. Исследование структуры и свойств образцов из жаропрочного сплава Inconel 738, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM) // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 1. С. 23–31. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-1-23-31.

ВВЕДЕНИЕ

Жаропрочные никелевые сплавы являются одними из основных материалов в авиации и двигателестроении. Они широко применяются для изготовления деталей газотурбинных двигателей, к которым предъявляются особые требования по длительной прочности, долговечности и надежности.

Перспективным материалом, отвечающим этим требованиям, является жаропрочный никелевый сплав Inconel 738. Он обладает необходимой коррозионной стойкостью, а также высокими показателями длительной прочности, благодаря чему широко применяется для изготовления наиболее ответственных деталей – лопаток газовой турбины.

Основой сплава Inconel 738 является никель, который не имеет полиморфных превращений и не подвергается охрупчиванию во всем диапазоне температур, чем обеспечивает сплаву запас вязкости и пластичности при достаточной прочности. Хром, в свою очередь, обеспечивает коррозионную стойкость сплава, а также дополнительно повышает его прочность. В качестве легирующих элементов в сплаве присутствуют Co, Mo, Al, W, Ti, образующие упрочняющую γ' -фазу. Основное упрочнение достигается за счет выделения интерметаллидных фаз с титаном и ниобием. Содержание в сплаве углерода обеспечивает упрочнение карбидной фазой. Стандартный режим термической обработки никелевого сплава Inconel 738 включает в себя высокотемпературную закалку и старение [1–3].

Из-за сложного многокомпонентного состава Inconel 738 обладает недостаточно высокими литейными свойствами, что выражается в возникновении ликвации, усадочных пор и трещин в течение технологического процесса. Применение порошковой металлургии в данном случае обеспечивает более равномерный химический состав по сечению детали, а также отсутствие зональной ликвации. Кроме того, порошковая металлургия позволяет получать детали заданной формы и размеров без применения окончательной механической обработки.

Жаропрочные порошковые материалы получают методом диспергирования расплава. Это позволяет производить порошки, обладающие хорошей спекаемостью, при стоимости, незначительно превышающей цену литого материала [4–6].

Развитие авиационного двигателестроения диктует повышение требований не только к применяемым материалам, но и к технологии производства деталей из них. В настоящее время стоит задача освоить экономически выгодную технологию, которая повышает КПД использования материала в сравнении с традиционными методами. Такой технологией является селективное лазерное сплавление (SLM – Selective Laser Melting) с применением методов порошковой металлургии.

Технология селективного лазерного сплавления заключается в послойном построении детали с использованием лазерного излучения высокой мощности. В процессе выращивания происходит избирательное сплавление порошкового материала в соответствии с компьютерной моделью. Среди особенностей данного метода выделяются возможность создавать изделия сложной конфигурации, соединение нескольких материалов с постепенным изменением свойств, уменьшение коли-

чества отходов производства, сокращение сроков изготовления, а также производство одновременно нескольких деталей. К недостаткам метода SLM относятся наличие остаточной пористости в структуре изготовленной детали, ограничение ассортимента используемых материалов и источников лазерного излучения, а также габаритов создаваемых изделий [7–9].

Технология SLM постоянно совершенствуется в направлении снижения пористости изготавливаемых изделий с помощью увеличения мощности лазерного излучения. Существуют установки, оснащенные лазером мощностью 400 Вт и выше, что значительно увеличивает скорость выращивания деталей этим методом [10–12].

Происходит активное внедрение методов постобработки деталей – горячего изостатического прессования (ГИП) и отжига. Основной задачей горячего изостатического прессования является уменьшение пористости, а также повышение однородности структуры детали. В процессе ГИП происходит одновременное воздействие высокой температуры и давления, создаваемого в газостате инертным газом, что позволяет закрывать поры и трещины в структуре изделия. Применение ГИП для деталей газотурбинных двигателей является неотъемлемой частью технологического процесса их производства, так как позволяет получать изделия с высоким коэффициентом использования материала, а также низкой остаточной пористостью. Постобработка деталей методом ГИП эффективна только в том случае, когда структурные дефекты являются замкнутыми, т. е. не имеют связи с поверхностью [13; 14].

Важным технологическим аспектом аддитивного производства является термическая обработка готовых изделий. После выращивания методом SLM материал характеризуется повышенной прочностью и пониженной пластичностью, что объясняется наличием остаточных термических напряжений. Для снятия остаточных напряжений применяется отжиг, который также повышает вязкость и пластичность материала.

С целью формирования окончательных свойств изделия применяются такие виды термообработки, как закалка и отпуск. В случае жаропрочных сплавов, имеющих в микроструктуре упрочняющую интерметаллидную фазу, проводится старение. Температурный режим и время выдержки подбираются индивидуально в зависимости от материала и характеристик, устанавливаемых техническим заданием.

Цель исследования – изучение влияния параметров технологического процесса на микроструктуру и механические свойства изделий, выращенных методом селективного лазерного сплавления.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы для исследования были изготовлены на установке селективного лазерного сплавления металлического порошка SLM 280HL. Режимы выращивания характеризуются следующими параметрами: мощность лазерного излучения, скорость сканирования, шаг сканирования, толщина слоя. В исследовании рассматривалась зависимость микроструктуры образцов от величины мощности, равной 75, 100, 125 и 325 Вт, а также влияние термической обработки на структуру и свойства образцов. Из полученных образцов изготавливались

шлифы в продольном и поперечном сечении на автоматической шлифовально-полировальной машине REMET LS250A.

Исследования микроструктуры после травления проводились на металлографическом микроскопе METAM ЛВ-31. Электронно-микроскопические исследования образцов и исходного порошкового материала проводились на растровом электронном микроскопе TESCAN Vega SB. Химический состав исходного порошкового материала определялся с помощью микроанализатора INCAx-Act.

Исследование механических свойств изделий, выращенных по технологии SLM, проводилось на универсально-испытательной машине Testometric FS 150 AX, для чего были изготовлены цилиндрические образцы в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Анализ данных, полученных в ходе металлографического исследования, осуществлялся с помощью программы анализа изображений NEXSYS ImageExpert Pro 3.

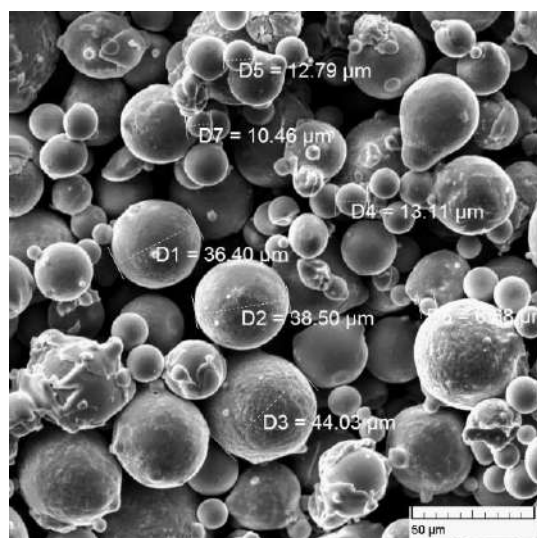
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Микроанализ показал, что химический состав порошка сплава Inconel 738 соответствует сертификату Q/AMC 4-2-10-2018 (таблица 1).

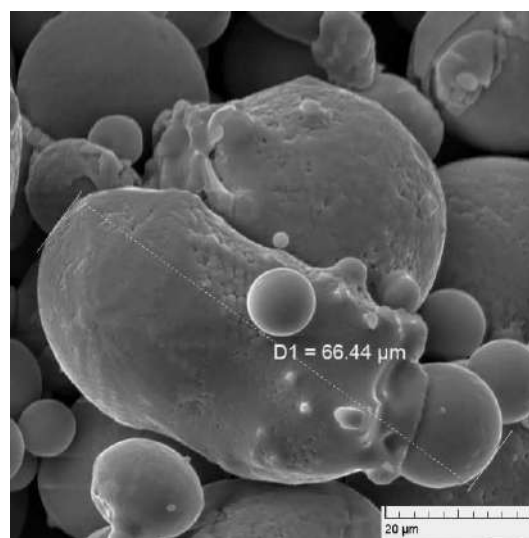
Электронно-микроскопический анализ исходного материала показал, что частицы порошка имеют сферическую форму, характерную для метода получения диспергированием расплава [15]. Размер частиц варьируется в диапазоне 15–53 мкм (рис. 1 а). Наблюдается наличие слипшихся частиц – конгломератов, средний размер которых составляет 70 мкм (рис. 1 б). Это объясняется различной

Таблица 1. Результаты химического анализа сплава Inconel 738
Table 1. The results of chemical analysis of Inconel 738 alloy

Элемент	Содержание, масс. %	Элемент	Содержание, масс. %
Ni	основа	Ti	3,06
Cr	15,60	Fe	0,07
Co	8,57	Nb	0,82
W	2,15	Ta	1,64
Mo	1,92	Zr	0,38
Al	4,06	Mn	0,05



a



b

Рис. 1. Конфигурация частиц порошка Inconel 738: а – внешний вид; б – конгломераты
Fig. 1. Configuration of particles of Inconel 738 powder: a – appearance; b – conglomerates

температурой плавления компонентов, входящих в состав сплава, и скоростью их кристаллизации. Наличие таких частиц не влияет на качество конечного изделия, так как они отсеиваются на ситах перед сплавлением. Металлографический анализ образца, выращенного при мощности 75 Вт, показал, что микроструктура представляет собой совокупность сплавленных частиц порошка, которые являются микрослитками и обладают дендритным строением, характерным для литого материала, которое обеспечивает сплаву термическую стабильность [16–18]. Микро-

структура поперечного сечения образца в центральной части характеризуется наличием дефектов – пор, которые, вероятно, образовались в результате недостаточного сплавления частиц порошка друг с другом (рис. 2 а) [19; 20]. Электронно-микроскопический анализ показал, что размеры пор варьируются в диапазоне 150–300 мкм (рис. 2 б).

С увеличением мощности до 100 Вт наблюдается уменьшение количества дефектов структуры (рис. 3 а). Общая пористость уменьшается при некотором увеличении их размеров (рис. 3 б).

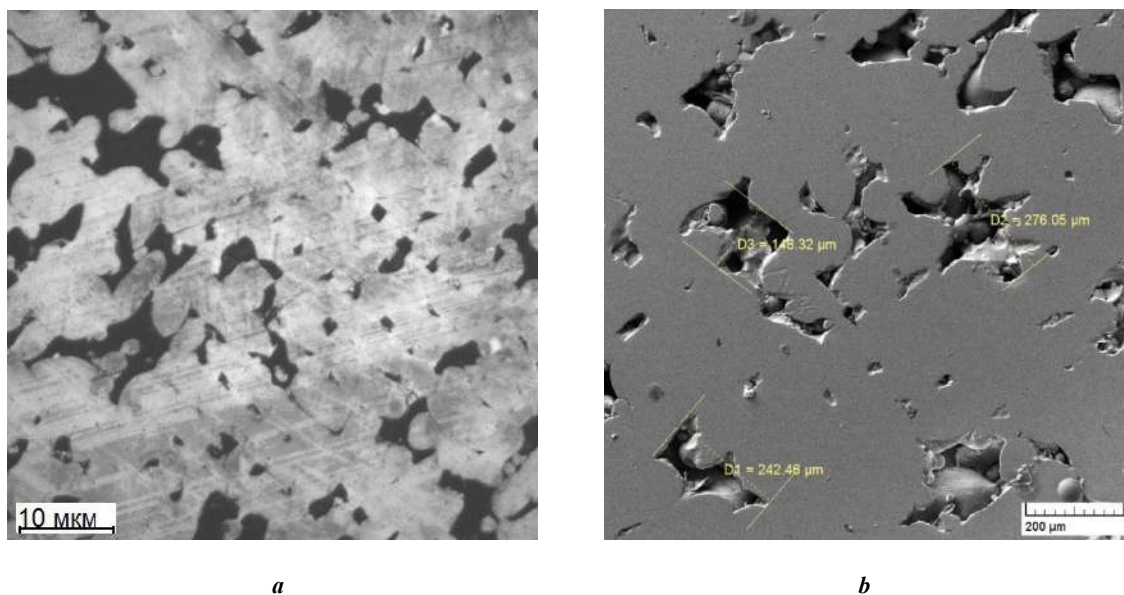


Рис. 2. Микроструктура образца, выращенного при мощности лазерного излучения 75 Вт:

а – металлографический микроскоп; б – РЭМ

Fig. 2. Microstructure of a specimen grown at laser output power of 75 W: а – metallographic microscope; б – SEM

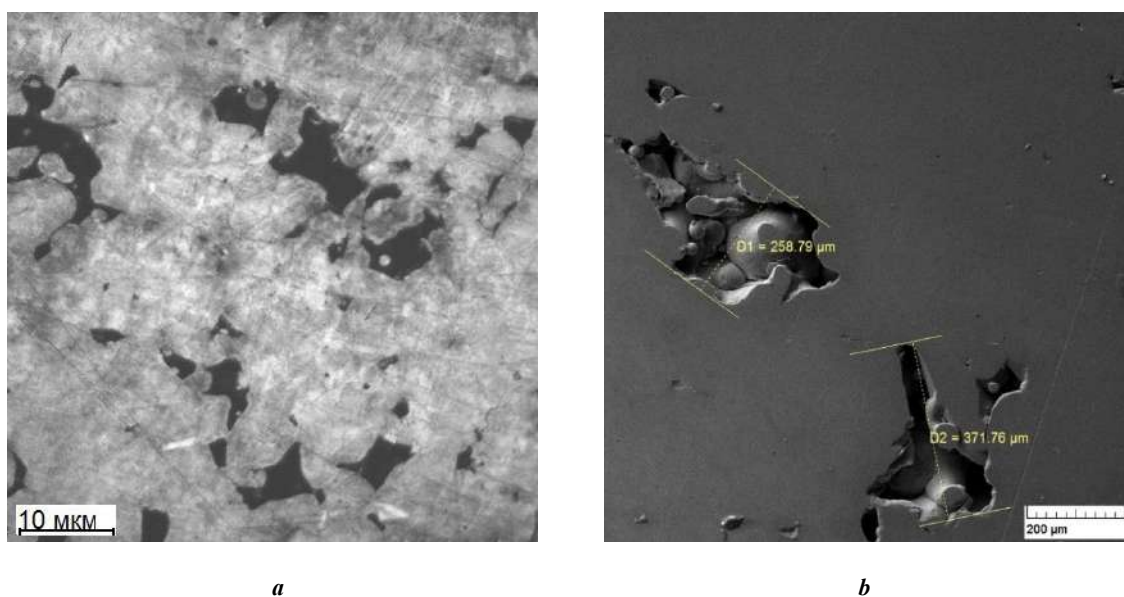


Рис. 3. Микроструктура образца, выращенного при мощности лазерного излучения 100 Вт:

а – металлографический микроскоп; б – РЭМ

Fig. 3. Microstructure of a specimen grown at laser output power of 100 W: а – metallographic microscope; б – SEM

С увеличением мощности до 125 Вт уменьшается пористость, но наблюдается образование трещин (рис. 4 а). Электронно-микроскопический анализ показал, что данный дефект образовался в результате усадки материала в процессе выращивания (рис. 4 б). Данные дефекты ориентированы относительно друг друга на угол 120° , что характерно для межкристаллитных трещин, прошедших по границам гранул.

Микроструктура поперечного сечения образца, выращенного при мощности 325 Вт, характеризуется наличием дефектов – микротрещин (рис. 5 а).

Микроструктура продольного сечения образцов представляет собой слои сплавленных частиц порошка и также характеризуется наличием дефектов – трещин (рис. 5 б).

С помощью программы анализа изображений NEXSYS ImageExpert Pro 3 установлено, что длина трещин в поперечном сечении образца варьируется в диапазоне 1,92–11,55 мкм, средняя длина составляет 4,15 мкм, а в продольном – 2,69–6,38 мкм, среднее значение 4,22 мкм. Трещины, являясь концентраторами напряжений, ухудшают механические свойства изделия.

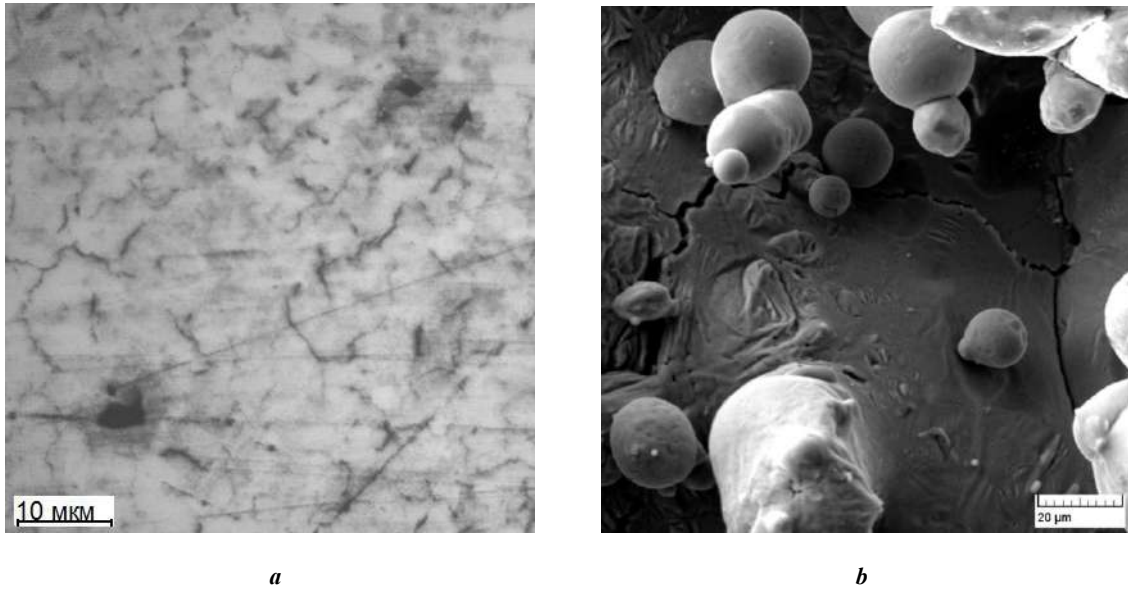


Рис. 4. Исследования образца, выращенного при мощности лазерного излучения 125 Вт:

а – металлографический анализ; **б** – излом

Fig. 4. The study of a specimen grown at laser output power of 125 W: **a** – metallographic analysis; **b** – fracture

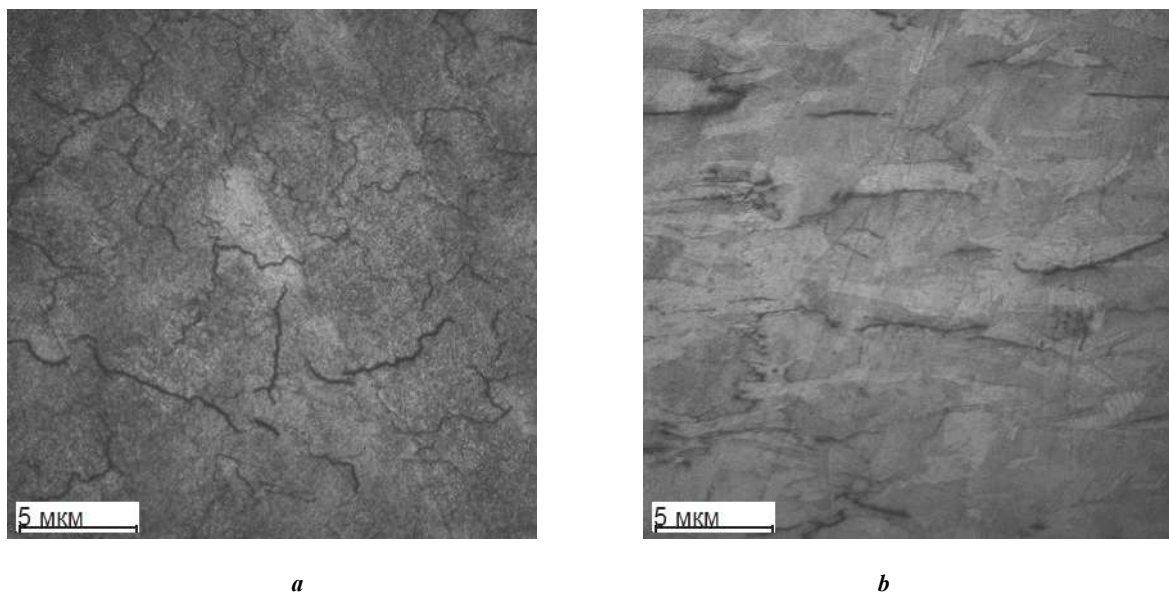


Рис. 5. Микроструктура образца, выращенного при мощности 375 Вт:

а – поперечное сечение; **б** – продольное сечение

Fig. 5. Microstructure of a specimen grown at laser output power of 375 W: **a** – cross section; **b** – long section

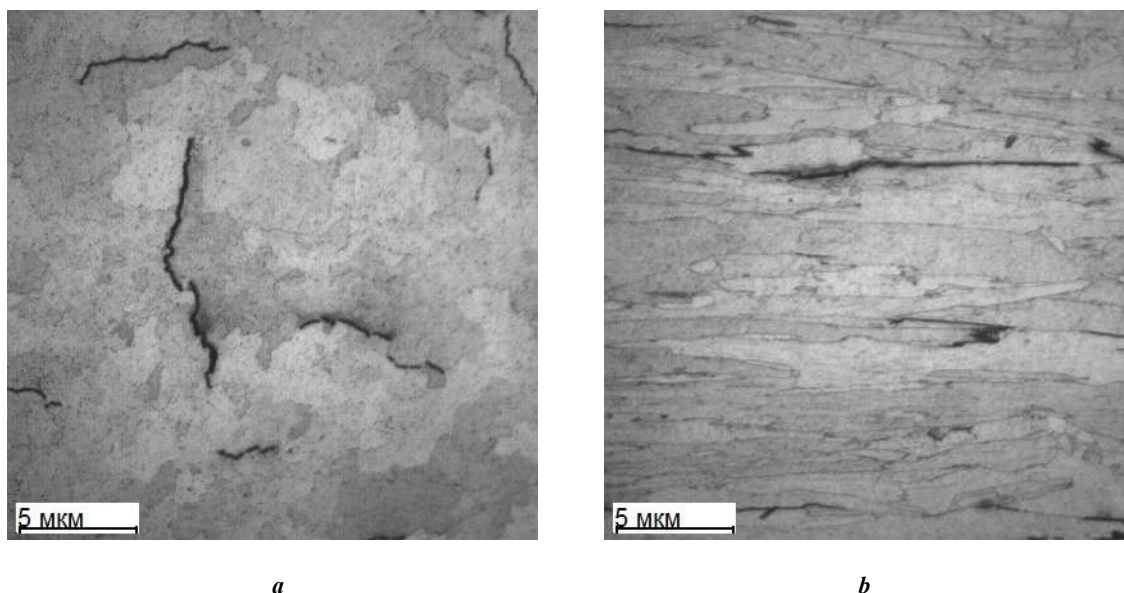


Рис. 6. Микроструктура образца, выращенного при мощности 375 Вт, подвергнутого термической обработке: *a* – поперечное сечение; *b* – продольное сечение
Fig. 6. Microstructure of a heat-treated specimen grown at laser output power of 375 W: *a* – cross section; *b* – long section

Таблица 2. Результаты механических испытаний
Table 2. The results of mechanical tests

Образец	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ , %
После выращивания	1025	602	3,7
После ТО	1421	670	19,5

Для повышения механических свойств и улучшения структуры образец, выращенный при мощности излучения 325 Вт, подвергался термической обработке – закалке со ступенчатым нагревом при температурах 400, 1050 и 1200 °С и выдержкой при максимальной температуре 240 мин. Охлаждение проводилось на воздухе.

Металлографический анализ показал, что после термической обработки уменьшилось количество дефектов – трещин, структура стала более однородной как в поперечном, так и в продольном сечении (рис. 6). Длина трещин в поперечном сечении образца варьируется в диапазоне 3,09–12,13 мкм, средняя длина составляет 6,27 мкм, а в продольном – 1,86–13,84 мкм, среднее значение 6,26 мкм.

После проведения термической обработки количество трещин по сечению уменьшилось, но более крупные дефекты устранить не удалось. Их средняя длина увеличилась, а ширина раскрытия трещин уменьшилась.

Механические испытания показали, что образцы, выращенные при мощности лазерного излучения 325 Вт, до и после термической обработки обладают следующими механическими свойствами (таблица 2).

После проведения ТО возросли механические характеристики. Резкий рост пластичности произошел

в результате прохождения процессов диффузии, рекристаллизации и залечивания дефектов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что механические свойства образцов, выращенных из Inconel 738, после термической обработки улучшаются.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследовано влияние мощности лазерного излучения на микроструктуру деталей, выращенных методом SLM. По результатам экспериментов подобран оптимальный режим для производства изделий из сплава Inconel 738 с мощностью лазерного излучения 325 Вт, что обеспечивает наименее дефектную микроструктуру образца.

Исследованы механические характеристики образцов, выращенных при оптимальном режиме, непосредственно после выращивания и после термической обработки. Анализ результатов показал, что термическая обработка положительно влияет на микроструктуру и механические свойства образца. После термической обработки наблюдается рост предела прочности, предела текучести и относительного удлинения до следующих значений: $\sigma_b=1421$ МПа, $\sigma_t=670$ МПа, $\delta=19,5$ %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zhang X., Chen H., Xu L., Xu J., Ren X., Chen X. Cracking mechanism and susceptibility of laser melting deposited Inconel 738 superalloy // *Materials and Design*. 2019. Vol. 183. P. 108105.
- Шарова Н.А., Тихомирова Е.А., Барабаш А.Л., Живушкин А.А., Брауэр В.Э. К вопросу о выборе новых жаропрочных никелевых сплавов для перспективных авиационных ГТД // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2009. № 3. С. 249–255.
- Ramakrishnan A., Dinda G.P. Direct laser metal deposition of Inconel 738 // *Materials Science & Engineering A*. 2019. Vol. 740-741. P. 1–13.
- Лукина Е.А., Зайцев Д.В., Сбитнева С.В., Заводов А.В. Строение и идентификация фаз в жаропрочных никелевых сплавах, синтезированных методом СЛС // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сб. трудов III Международной конференции*. М.: ВИАМ, 2017. С. 5.
- Каблов Е.Н. Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1. С. 3–33.
- Гращенко Д.В., Щетанов Б.В., Ефимочкин И.Ю. Развитие порошковой металлургии жаропрочных материалов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2011. № 5. С. 13–26.
- Суфияров В.Ш., Попович А.А., Борисов Е.В., Полозов И.А. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава // *Цветные металлы*. 2015. № 1. С. 79–84.
- Cloots M., Uggowitz P.J., Wegener K. Investigations on the microstructure and crack formation of IN738LC samples processed by selective laser melting using Gaussian and doughnut profiles // *Materials and Design*. 2016. Vol. 89. P. 770–784.
- Каблов Е.Н. Настоящее и будущее аддитивных технологий // *Металлы Евразии*. 2017. № 1. С. 2–6.
- Евгенов А.Г., Роголев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // *Труды ВИАМ*. 2015. № 2. С. 2.
- Horn T., Harrysson O.L.A. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications // *Science Progress*. 2012. Vol. 95. № 3. P. 255–282.
- Сотов А.В., Проничев Н.Д., Смелов В.Г., Богданович В.И., Гиорбелидзе М.Г., Агаповичев А.В. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления деталей ГТД методом селективного лазерного сплавления порошка жаропрочного сплава ВВ751П // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2017. Т. 19. № 4. С. 96–104.
- Павленко Д.В. Технологические методы уплотнения спеченных титановых заготовок // *Вестник двигателестроения*. 2015. № 1. С. 87–93.
- Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В. Исследование структуры и механических свойств изделий, полученных методом СЛС из порошка стали 316L // *Черные металлы*. 2016. № 9. С. 61–65.
- Wang H., Zhang X., Wang G.B., Shen J., Zhang G.Q., Li Y.P., Yan M. Selective laser melting of the hard-to-weld IN738LC superalloy: Efforts to mitigate defects and the resultant microstructural and mechanical properties // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 807. P. 151662.
- Чабина Е.Б., Филонова Е.В., Раевских А.Н. Влияние технологических параметров процесса селективного лазерного сплавления на формирование структуры жаропрочного никелевого сплава // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы II Международной конференции*. М.: ВИАМ, 2016. С. 4.
- Engeli R., Etter T., Hovel S., Wegener K. Processability of different IN738LC powder batches by selective laser melting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 229. P. 484–491.
- Hossein E., Popovich V.A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718 // *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 30. P. 100877.
- Ерёмин Е.Н., Филиппов Ю.О., Миннеханов Г.Н., Мухин В.Ф. Исследование структурных изменений в модифицированном жаропрочном никелевом сплаве // *Омский научный вестник*. 2011. № 3. С. 65–70.
- Сухов Д.И., Базылева О.А., Неруш С.В., Аргинбаева Э.Г., Зайцев Д.В. Особенности структуры и свойств материала жаропрочного интерметаллидного никелевого сплава, полученного методом селективного лазерного сплавления // *Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы IV Международной конференции*. М.: ВИАМ, 2018. С. 28.

REFERENCES

- Zhang X., Chen H., Xu L., Xu J., Ren X., Chen X. Cracking mechanism and susceptibility of laser melting deposited Inconel 738 superalloy. *Materials and Design*, 2019, vol. 183, p. 108105.
- Sharova N.A., Tikhomirova E.A., Barabash A.L., Zhivushkin A.A., Brauer V.E. Selection of new heat-resistant nickel alloys for advanced aviation engines. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2009, no. 3, pp. 249–255.
- Ramakrishnan A., Dinda G.P. Direct laser metal deposition of Inconel 738. *Materials Science & Engineering A*, 2019, vol. 740-741, pp. 1–13.
- Lukina E.A., Zaytsev D.V., Sbitneva S.V., Zavodov A.V. The structure and phase identification in heat-resistant nickel alloys synthesized by the SLS method. *Sbornik трудов III Mezhdunarodnoy konferentsii "Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee"*. Moscow, VIAM Publ., 2017, p. 5.
- Kablov E.N. Strategical Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 3–33.
- Grashchenkov D.V., Shchetanov B.V., Efimochkin I.Yu. Development of powder metallurgy of heat-resistant materials. *Vse materialy. Entsiklopedichesky spravochnik*, 2011, no. 5, pp. 13–26.
- Sufiyarov V.Sh., Popovich A.A., Borisov E.V., Polozov I.A. Selective laser melting of heat-resistant nickel alloy. *Tsvetnye metally*, 2015, no. 1, pp. 79–84.
- Cloots M., Uggowitz P.J., Wegener K. Investigations on the microstructure and crack formation of IN738LC samples processed by selective laser melting using Gaussian and doughnut profiles. *Materials and Design*, 2016, vol. 89, pp. 770–784.

9. Kablov E.N. The present and future of additive technology. *Metally Evrazii*, 2017, no. 1, pp. 2–6.
10. Evgenov A.G., Rogalev A.M., Nerush S.V., Mazalov I.S. A study of properties of EP648 alloy manufactured by the selective laser sintering of metal powders. *Trudy VIAM*, 2015, no. 2, p. 2.
11. Horn T., Harrysson O.L.A. Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science Progress*, 2012, vol. 95, no. 3, pp. 255–282.
12. Sotov A.V., Pronichev N.D., Smelov V.G., Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G., Agapovichev A.V. Development algorithm of the technological process of manufacturing gas turbine parts by selective laser melting. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 96–104.
13. Pavlenko D.V. Technological methods of sealing sintered titanium billets. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 1, pp. 87–93.
14. Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V. Study of structures and mechanical properties of products manufactured via selective laser sintering of 316L steel powder. *Chernye metally*, 2016, no. 9, pp. 61–65.
15. Wang H., Zhang X., Wang G.B., Shen J., Zhang G.Q., Li Y.P., Yan M. Selective laser melting of the hard-to-weld IN738LC superalloy: Efforts to mitigate defects and the resultant microstructural and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 807, pp. 151662.
16. Chabina E.B., Filonova E.V., Raevskikh A.N. The influence of technological parameters of the selective laser fusion process on the formation of the structure of heat-resistant nickel alloy. *Materialy II Mezhdunarodnoy konferentsii "Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee"*. Moscow, VIAM Publ., 2016, p. 4.
17. Engeli R., Etter T., Hovel S., Wegener K. Processability of different IN738LC powder batches by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 229, pp. 484–491.
18. Hossein E., Popovich V.A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 30, pp. 100877.
19. Eremin E.N., Filippov Yu.O., Minnekhanov G.N., Mukhin V.F. The analysis of structural change in modifying heat-resistant nickel alloy. *Omsky nauchny vestnik*, 2011, no. 3, pp. 65–70.
20. Sukhov D.I., Bazyleva O.A., Nerush S.V., Arginbaeva E.G., Zaytsev D.V. Features of the structure and properties of the material of heat-resistant intermetallic nickel alloy obtained by selective laser fusion. *Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii "Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee"*. Moscow, VIAM Publ., 2018, p. 28.

The study of the structure and properties of specimens of Inconel 738 heat-resisting alloy obtained by the selective laser melting technique (SLM)

© 2020

Mariya O. Dmitrieva^{*1,3}, student

Aleksey A. Melnikov^{1,4}, PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair of Metal Technology and Aviation Materials Science

Andrey M. Golovach^{1,5}, student

Olga S. Bondareva^{1,6}, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair of Metal Technology and Aviation Materials Science

Vitaly G. Smelov^{1,2,7}, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Engine Production Techniques,
senior researcher of Innovative Production Technologies Institute (IPIT-216)

Anton V. Sotov^{1,2,8}, PhD (Engineering), assistant of Chair of Engine Production Techniques,
junior researcher of Innovative Production Technologies Institute (IPIT-216)

Anton V. Agapovichev^{1,9}, assistant Chair of Engine Production Techniques,
junior researcher of Innovative Production Technologies Institute (IPIT-216)

¹Academician S.P. Korolev Samara National Research University, Samara (Russia)

²A.A. Blagonravov Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow (Russia)

*E-mail: mdmitr1ewa@yandex.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4874-9278>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1953-3670>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1329-3001>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4273-2483>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9556-6290>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

⁹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0042-7333>

Abstract: Currently, the selective laser melting technique (SLM) with the use of powder metallic materials is a promising area in the aircraft and engine technology. Due to this technique, it is possible to produce parts with any complexity configuration at fewer expenses for tooling and mechanical processing and the prototyping of goods becomes simpler as well. The issue of application of powder materials of heat-resisting alloys in the additive production is particularly topical, which is due to the problems caused by their complex chemical composition, insufficient thermal conductivity, and shrinkage tendency. The paper studies the influence of laser output power on the microstructure and properties of specimens of

Inconel 738 heat-resisting nickel alloy produced with the help of a commercial 3-D printer using the SLM printing technology. Moreover, the authors considered the way of improvement of the specimens' mechanical properties through the improvement of microstructure after SLM and further heat treatment. The authors carried out the metallographic and electron microscopic study of the initial material and the specimens grown using the SLM technology at the laser output power of 75, 100, 125, and 325 W; analyzed the microstructure evolution in the result of heating caused by the growth of supply energy. Further heat treatment made it possible to study the influence of step quenching on the microstructure and mechanical properties of specimens. Further heat treatment made it possible to study the influence of step quenching on the microstructure and mechanical properties of specimens. The authors determined the optimum technological parameters of laser emission to produce parts from Inconel 738 heat-resisting alloy using the SLM technique and produced parts with the minimum quantity of the defects. The study identified that heat treatment, including step quenching, improves the mechanical properties – ultimate resistance, yield limit, and percent elongation – through the “healing” and the defects' size reduction.

Keywords: heat-resisting nickel alloy; microstructure; selective laser melting; electron microscopy; Inconel 738.

Acknowledgements: The paper was written on the reports of the participants of the IX International School of Physical Materials Science (SPM-2019) with elements of a scientific school for young adults, Togliatti, September 9–13, 2019.

For citation: Dmitrieva M.O., Melnikov A.A., Golovach A.M., Bondareva O.S., Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V. The study of the structure and properties of specimens of Inconel 738 heat-resisting alloy obtained by the selective laser melting technique (SLM). *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 23–31. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-1-23-31.