



Влияние термической обработки на структурно-фазовое состояние и ударную вязкость никелевого сплава Inconel 718 при аддитивном производстве

М. В. Рашковец¹, Н. Г. Кислов², А. А. Никулина¹,
О. Г. Климова-Корсмик²

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

² Санкт-Петербургский морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

Проведен анализ фазового состава жаропрочного никелевого сплава Inconel 718, сформированного аддитивной технологией прямого лазерного выращивания с применением волоконного лазера ЛС-3. Методами структурных исследований установлено, что основной упрочняющей фазой сплава после термической обработки является γ' -фаза. Выделение δ -фазы происходит в области частиц фазы Лавеса. Усталостные испытания показывают повышение ударной вязкости в 1,5 раза при смене направления выращивания с продольной ориентации на поперечную относительно динамического воздействия на материал в исходном и термически обработанном состоянии. Распространение трещины в исходном состоянии сопровождается разрушением частиц фазы Лавеса и обходом в термически обработанном материале.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, аддитивные технологии, фазовый состав, термическая обработка, ударная вязкость

Статья получена: 11.10.2021

Статья принята: 25.11.2021

Effect of Heat Treatment on the Structure, Phase Composition and Impact Toughness of Inconel 718 Alloy Under Additive Manufacturing

M.V.Rashkovets¹, N.G.Kislov², A.A. Nikulina¹,
O.G. Klimova-Korsmik²

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

² St. Petersburg Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

Phase composition of the laser additively manufactured Inconel 718 alloy was investigated. The main strengthening phase of heat-treated materials conditions is γ' phase. δ phase deposited near Laves phase particles. Charpy impact tests show increasing of toughness in 1.5 times with the changing of building direction from parallel to transverse in as-deposited and heat-treated materials conditions. Crack propagation in the as-deposited samples is accompanied by the destruction of particles of the Laves phase and bypass them in the heat-treated material.

Key words: heat-resistance Ni-base alloys, additive manufacturing, phase composition, heat treatment, impact toughness

Received on: 11.10.2021

Accepted on: 25.11.2021

INTRODUCTION

The mechanical properties of additively formed materials depend on the complex ratio of a number of process parameters. Therefore, the evaluation of strength characteristics under conditions of external loading is an important applied task. A number of previously published works describe static tests, more recent studies are devoted to the evaluation of mechanical properties under dynamic and cyclic loading. A direct comparison of the mechanical properties of additively formed materials with each other is difficult, due to the high sensitivity of materials to varying technological parameters and conditions of deposition. Literature data indicate the dependence of strength char-

ВВЕДЕНИЕ

Механические свойства аддитивно сформированных материалов зависят от комплексного соотношения ряда технологических параметров, поэтому оценка прочностных характеристик в условиях внешнего нагружения является важной прикладной задачей. Ряд опубликованных ранее работ описывает статические испытания, более поздние исследования посвящены оценке механических свойств при динамическом и циклическом нагружении. Прямое сравнение между собой механических характеристик аддитивно сформированных материалов затруднительно, что обусловлено высокой чувствительностью материалов к варьированию технологических параметров и условий выращивания изделий. Опубликованные в научной литературе данные свидетельствуют о зависимости прочностных характеристик в отношении ориентации слоев и направления внешней нагрузки [1-3]. Однако не менее важным фактором является фазовый состав материалов. Исходя из этого особенно важно знать механические характеристики материала и то, какие факторы могут оказать влияние на развитие разрушения.

Жаропрочные никелевые сплавы широко применяются в авиа- и ракетостроении при производстве сложнопрофильных элементов газотурбинных двигателей. Упрочнение материалов происходит в ходе термической обработки, которая заключается не только в формировании основных интерметаллидных γ' - и γ'' -фаз, но и в растворении снижающих механические свойства фаз Лавеса, δ -фазы и карбидов [4, 5]. Широкие температурные интервалы, а также временные выдержки, которые могут достигать 32 часов [6] при термической обработке жаропрочных никелевых сплавов, подтверждают, что универсального режима, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор не найдено. А учитывая особенности структурно-фазового состояния аддитивно сформированных материалов, влияние термической обработки, назначаемой при классических технологиях, не однозначно.

В настоящей работе представлена оценка структурно-фазового состояния и прочностных характеристик аддитивно сформированного никелевого сплава Inconel 718 в исходном и термообработанном состоянии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исходным материалом исследований являлся сферический порошок никелевого сплава Inconel 718 со следующим химическим составом: Ni (63.4%), Cr (21%), Mo (10%), Fe (0.8%), Al (0.4%), Ti (0.4%), Nb (3%), Si (0.5%), Mn (0.4%), C (0.1%).

acteristics in relation to the orientation of the layers and the direction of loading [1-3]. However, phase composition of materials is no less important factor. Based on this, it is especially important to know the mechanical properties of additively formed material and factors that affect the fracture.

Heat-resistant nickel-base alloys are widely used in aircraft and rocketry in the production of complex elements of gas turbine engines. Strengthening of materials occurs during heat treatment, which consists not only in the formation of the main intermetallic γ' and γ'' phases, but also in the dissolution of Laves phases, δ -phases and carbides that reduce the mechanical properties [4, 5]. There are industrial standard heat treatment modes, but also numerous studies show a wide range of temperature range and time holding during heat treatment, which can reach 32 hours [6]. All this confirms that a universal mode has not yet been found. Moreover, given the differences of the structure and phase composition of additively formed materials with the conventional manufacturing, the effect of standard heat treatment is ambiguous.

This paper presents the evaluation of structure, phase composition and mechanical properties of as-deposited and heat-treated samples.

MATERIAL AND METHODS

The initial material of the research was spherical powder of nickel-base alloy Inconel 718 with the following chemical composition: Ni (63.4%), Cr (21%), Mo (10%), Fe (0.8%), Al (0.4%), Ti (0.4%), Nb (3%), Si (0.5%), Mn (0.4%), C (0.1%).

Direct laser deposition unit consisted of a LRM-200iD 7L Fanuc robotic complex, an LS-3 IPG Photonics laser source, a FLW D30 IPG Photonics laser head with a removable SO12 Fraunhofer IWS surfacing nozzle and a Sulzer Metco Twin 10C powder feed device to the working area. The radiation beam had a Gaussian distribution, a wavelength of 1070 nm, a collimating lens focus of 200 mm, and a collimator focus of 100 mm. Beam Parameter Product (BPP) 3.5mm \times mrad. The working surface was located 36 mm behind the focus of the beam, and the spot diameter was 2.6 mm. The additive process was carried out in a protective Ar environment without preheating with the following parameters: laser power 1300 W, powder feed rate 0.8 g/s, scanning speed 25 mm/s, layer step 0.6 mm.

The industrial standard heat treatment for Inconel 718 castings and forgings, performed in a universal laboratory muffle electric furnace SNOL in an air atmosphere, was as follows: solution treatments (980°C / 1 h / air cooling) + double aging (720°C / 8 h / furnace cooling at 55°C/h to 620°C / 8 h / air cooling).

To analyze the microstructure of the deposited material, a Carl Zeiss EVO50 XVP scanning electron microscope was used. Charpy impact tests were carried out using an Instron

Аддитивная установка прямого лазерного выращивания состояла из роботизированного комплекса LRM-200iD 7L Fanuc, лазерного источника LS-3 IPC Photonics, лазерной головки FLW D30 IPC Photonics со съемным соплом для наплавки SO12 Fraunhofer IWS и устройством подачи порошка в рабочую зону Sulzer Metco Twin 10C. Пучок излучения имел гаусово распределение, длину волны 1070 нм, фокус коллимирующей линзы 200 мм, фокус коллиматора 100 мм. Качество пучка (Beam Parameter Product – BPP) 3,5 мм·мрад. Рабочая поверхность находилась на 36 мм за фокусом пучка, при этом диаметр пятна со ставил 2,6 мм. Аддитивный процесс проводился в защитной среде Ar без предварительного подогрева со следующими параметрами: мощность лазера 1300 Вт, скорость подачи порошка 0,8 г/с, скорость сканирования 25 мм/с, шаг слоя 0,6 мм.

Технологический маршрут термической обработки, выполненной в универсальной лабораторной муфельной электропечи SNOLE в воздушной атмосфере, был следующий: отжиг на твердый раствор при температуре 980 °С в течение 1 часа с последующим быстрым охлаждением на воздухе и двухступенчатый отпуск при температуре 720 °С с выдержкой 8 часов и охлаждением в печи со скоростью 55 °С/час до 620 °С с дальнейшей 8-часовой выдержкой и воздушным охлаждением до комнатной температуры.

Для анализа микроструктуры выращенного материала применялся растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EVO50 XVP. Испытания материалов на ударный изгиб по Шарпи были проведены при помощи маятникового копра Instron CEAST 9050 Impact Pendulum по схемам, представленным на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микроструктура аддитивно сформированного жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до термической обработки характеризовалась дендритным строением с присутствием зон сплавления между последовательными слоям (рис. 2). Матрица сплава была представлена твердым раствором на основе никеля, междендритное пространство характеризовалось наличием мелкодисперсных первичных карбидов, карбонитридов и фазы Лавеса. Упрочняющих γ' - и γ'' - фаз выявлено не было.

Микроструктура сплава после применения термической обработки представлена на рис. 3. При реализации аддитивного процесса прямого лазерного выращивания основное влияние на перераспределение легирующих элементов, по всей видимости, оказывало наличие в матрице карбонитридов (Nb, Ti)(N, C), которые, будучи чрезвычайно устойчивыми при последующем высокотемпературном

CEAST 9050 Impact Pendulum. The schemes of experiments are shown in Figure 1.

RESULTS AND DISCUSSION

The microstructure of the as-deposited and heat-treated samples of heat-resistant nickel-base alloy Inconel 718 was characterized by a dendritic structure with the presence of fusion zones between successive layers (Fig. 2). The matrix was represented by Ni solid solution, the interdendritic regions was characterized by the presence of finely dispersed primary carbides, carbonitrides, and Laves phase. The straightening gamma' and gamma'' phases were not identified.

The microstructure of heat-treated sample is shown in Figure 3. The main influence on the redistribution of alloying elements probably was exerted by the presence in the matrix of carbonitrides (Nb, Ti)(N, C) during direct laser deposition process. Their being extremely stable upon subsequent high-temperature heating to 980°C [7] and still contain a significant amount of Nb. In contrast, Laves phase was partially dissolved and enriched the surrounding regions with Nb, which led to the formation of δ -phase

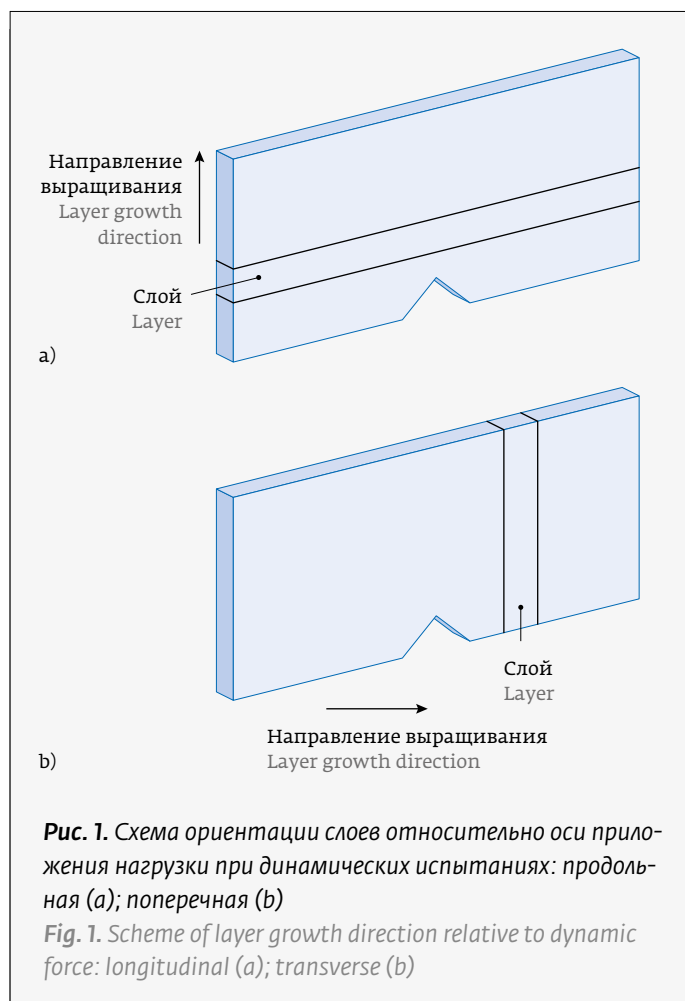


Рис. 1. Схема ориентации слоев относительно оси приложения нагрузки при динамических испытаниях: продольная (а); поперечная (б)

Fig. 1. Scheme of layer growth direction relative to dynamic force: longitudinal (a); transverse (b)

нагреве до 980 °С [7], по-прежнему содержат значительное количество ниобия, в то время как фаза Лавеса, частично растворяясь, насыщает им окружающие области, что привело к формированию δ -фазы исключительно в данных областях. Так как большинство ниобия остается в связанном состоянии в составе химических соединений $(Nb, Ti)(N, C)$, а также он участвует в формировании δ -фазы, основной упрочняющей фазой в сплаве после термической обработки является γ' -фаза на основе химического соединения $Ni_3(Al, Ti)$ с характерной кубической морфологией и максимальным размером порядка 1 мкм.

Результаты оценки ударной вязкости аддитивно сформированных материалов показали ожидаемую зависимость от ориентации слоев и направления приложения динамической нагрузки ввиду того, что в ходе термической обработки в материале не произошел процесс рекристаллизации с сохранением дендритной структуры и наличием зон сплавления. С приложением динамической нагрузки в продольном направлении относительно направления выращивания трещина распространялась вдоль столбчатых кристаллов. Значение ударной вязкости в данных условиях составило 48,3 Дж/см². Фрактографический анализ образцов с продольной ориентацией подтвердил, что разрушение проходило по междендритному пространству. На поверхности разрушения также присутствуют ямки, свидетельствующие о вязком механизме разрушения (рис. 4 а, б). Поперечная ориентация образцов динамическому удару сопровождалась повышением ударной вязкости в 1,5 раза (71,7 Дж/см²), что обусловлено дополнительными затратами энергии на торможение трещины при встрече с границами мелкодисперсных зерен, расположенных перпендикулярно ее ходу (рис. 4 б, д). Сопоставление результатов микроструктурного исследования и поверхностей разрушения после испытаний позволяет сделать вывод о том, что исходные мелкодисперсные частицы фазы Лавеса, формирующиеся при аддитивном процессе прямого лазерного выращивания в междендритных пространствах, могли способствовать зарождению и распространению трещины в отношении обеих схем нагружения (рис. 3 с, д).

После применения термической обработки уровень ударной вязкости материала вырос в 1,5 раза в отношении обеих схем нагружения. Значения ударной вязкости составили 116,7 Дж/см² и 75 Дж/см² для поперечной и продольной ориентации соответственно. Характер изломов термически обработанных образцов аналогичен материалам после аддитивного процесса (рис. 5 а, б). Принимая это во внимание, можно сделать вывод о том, что основной вклад в упрочнение материала, не прошедшего рекристаллизацию при



Рис. 2. Исходная микроструктура сплава Inconel 718 после аддитивного процесса прямого лазерного выращивания

Fig. 2. Initial microstructure of Inconel 718 alloy after additive process of direct laser deposition

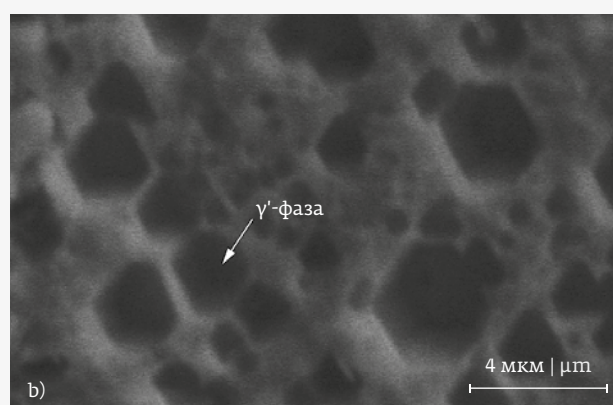
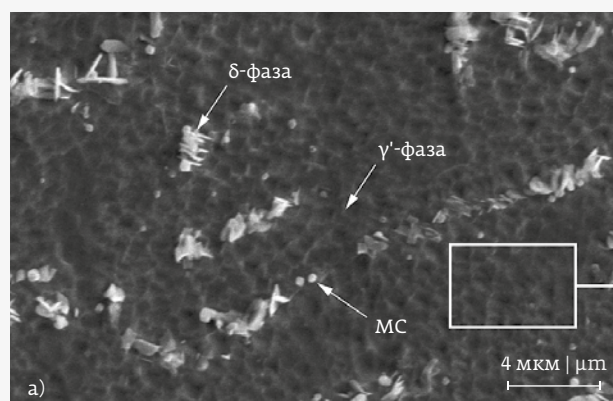


Рис. 3. Микроструктура аддитивно сформированного никелевого сплава после термической обработки

Fig. 3. Microstructure of an additively formed nickel-base alloy after heat treatment

реализации термической обработки, вносит выделение γ' -фазы. Учитывая фазовый состав после термической обработки (рис. 2), можно предположить, что распространение трещины при достижении мелких закрепленных с матрицей δ -фазой частиц фазы Лавеса совершалось обходом (рис. 5 с, d).

ВЫВОДЫ

Исходный фазовый состав никелевого сплава системы Inconel 718 после аддитивного процесса прямого лазерного выращивания существенно влияет на фазовый состав продуктов реакции термической обработки. Нагрев до 980 °C в течение 1 часа приводит к выделению δ -фазы исключительно на участках частично растворенной фазы Лавеса. В ходе последующей операции двухступенчатого отпуска при температурах 720 °C и 620 °C с выдержками по 8 часов образуется упрочняющая γ' -фаза с характерной направленной кубической морфологией и максимальным размером порядка 1 мкм. Характеристики прочности послойно сформиро-

exclusively in these regions. Since the main volume of Nb still remains in carbides and carbonitrides and also participates in the precipitation of δ -phase, the main straightening phase after heat treatment is gamma' phase. This phase based on Ni3(Al, Ti) and characterized with a typical cubic geometry and a maximum size of about 1 μm (Fig. 3).

Charpy test of the as-deposited samples showed the expected dependence on the layer growth direction and dynamic force orientation. Crack propagated along the columnar grains in case of scheme with longitudinal orientation. The impact toughness was 48.3 J/cm². Fractography confirmed that the fracture occurred along the interdendritic region. Also, dimples present on the fracture surface indicate ductile fracture mode (Fig. 4 a, c). The results of impact toughness in case of transverse orientation scheme increased 1.5 times (71.7 J/cm²). The increase of impact toughness is due to the additional energy absorption manifested in crack overcomes the grains boundaries located perpendicular to cracks propagation (Fig. 4 b, d). Moreover, comparison of the results on microstructural study and

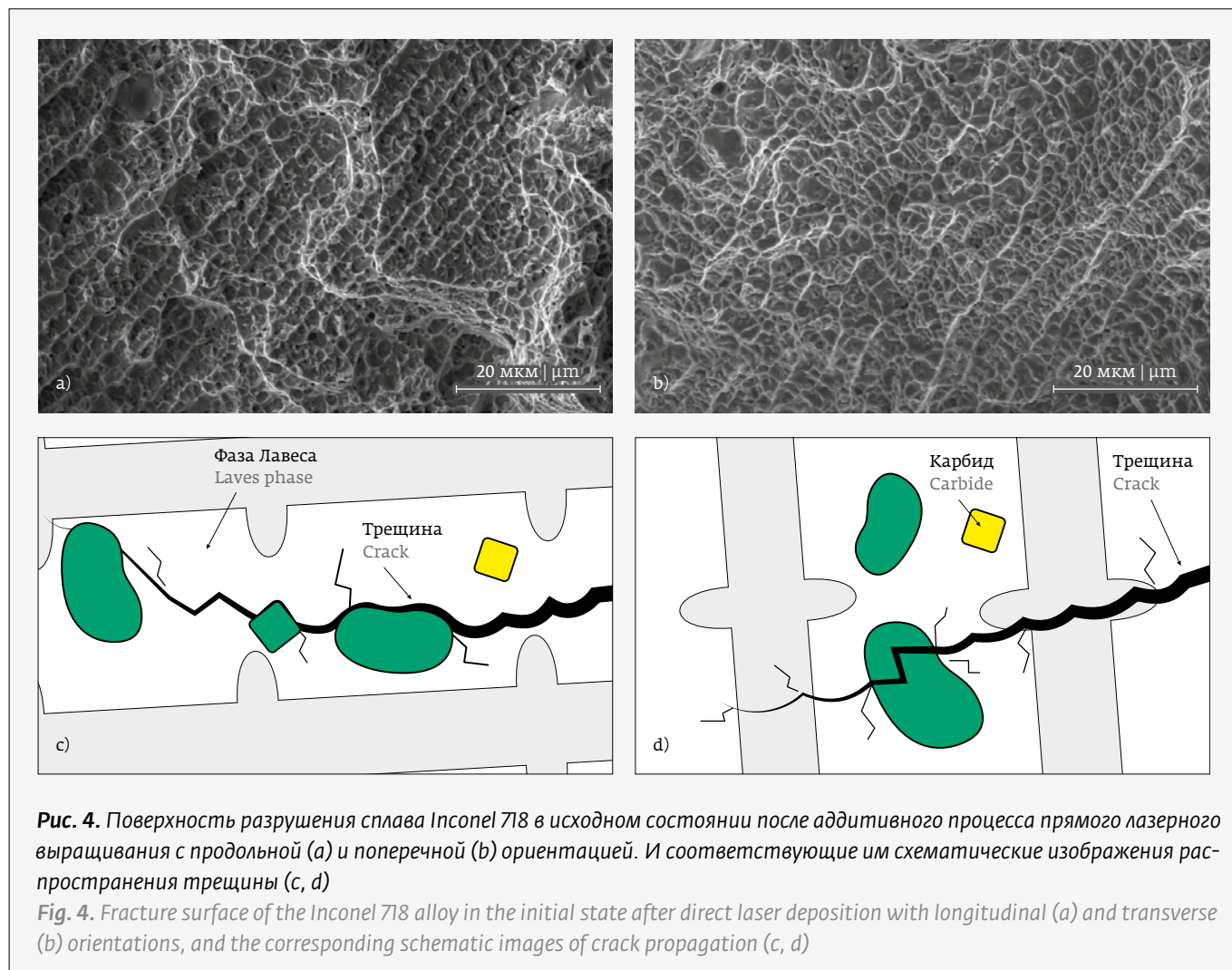


Рис. 4. Поверхность разрушения сплава Inconel 718 в исходном состоянии после аддитивного процесса прямого лазерного выращивания с продольной (а) и поперечной (б) ориентацией. И соответствующие им схематические изображения распространения трещины (с, d)

Fig. 4. Fracture surface of the Inconel 718 alloy in the initial state after direct laser deposition with longitudinal (a) and transverse (b) orientations, and the corresponding schematic images of crack propagation (c, d)

ванного материала в значительной степени определяются отношением направления внешнего нагружения и ориентацией слоев в массиве заготовки. Разница между продольной и поперечной ориентацией слоев составляет 23,4 Дж/см². Повышение ударной вязкости в 1,5 раза при условии сохранения столбчатой структуры после применения термической обработки аддитивно сформированного никелевого сплава Inconel 718 обусловлено выделением упрочняющей γ' -фазы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при финансированной поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90131 «Исследование закономерностей усталостного и динамического разрушения жаропрочных сплавов, полученных аддитивными технологиями» (2019–2021 гг.).

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» НГТУ № 13. ЦКП.21.0034.

REFERENCES

1. Lewandowski J. J., Seifi M. Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. *Annual review of materials research*. 2016; 46: 151–186. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070115-032024.
2. Strößner J., Terock M., Glatzel U. Mechanical and microstructural investigation of nickel-based superalloy IN718 manufactured by selective laser melting (SLM). *Advanced Engineering Materials*. 2015; 17(8): 1099–1105. DOI: 10.1002/adem.201500158.

fracture surfaces after Charpy test allows us to conclude that the initial fine particles of Laves phase, formed during direct laser deposition process in interdendrite regions, could contribute to crack initiation and propagation in relation to both loading schemes (Fig. 3 c, d).

The impact toughness of the heat-treated samples increased 1.5 times in relation to both loading schemes. The impact toughness was 116.7 J/cm² and 75 J/cm² for transverse and longitudinal orientation, respectively. The fractography of heat-treated samples has the similar mode as the as-deposited samples since recrystallization did not occur during heat treatment (Fig. 5 a, b). With this context, we can conclude that the main contribution to the strengthening of the heat-treated samples that did not undergo recrystallization during the heat treatment corresponds to precipitation of gamma' phase. Also, considering the phase composition after heat treatment (Fig. 3), it can be assumed that cracks bypassed small Laves particles which fixed with matrix by δ -phase (Fig. 5 c, d).

CONCLUSIONS

The initial phase composition of nickel-base alloy Inconel 718 after direct laser deposition significantly affects the phase composition of heat treatment state. Heating up to 980 °C for 1 hour leads to precipitate of δ -phase exclusively

КАЗАНЬ 2021



**МАШИНОСТРОЕНИЕ
МЕТАЛЛООБРАБОТКА
СВАРКА**

1-3/12

ОСНОВНЫЕ ЦИФРЫ ВЫСТАВКИ 2019 ГОДА

| | | |
|--|---|--|
| 223 компаний <small>из 29 регионов России и 5 стран мира</small> | 9013 посетителей <small>из 60 стран РФ и 8 стран мира</small> | 4031 кв. м. <small>выставочной площади</small> |
|--|---|--|

21-я международная специализированная выставка
ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИБОРОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ,
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ И СВАРОЧНОЙ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Оргкомитет выставки
Тел/факс: [843] 202-29-03
Россия, 420059, г. Казань,
Оренбургский тракт, д. 8,
ОАО «Казанская ярмарка»
www.expomach.expokazan.ru
E-mail: expo-kazan@mail.ru

 Место проведения:
МВЦ «Казань Экспо»



Забронировать
СТЕНД



16+



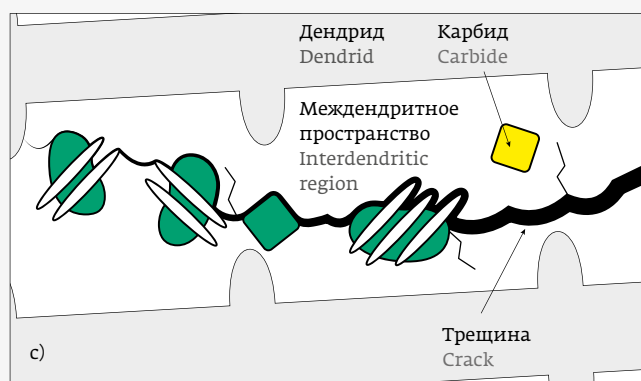
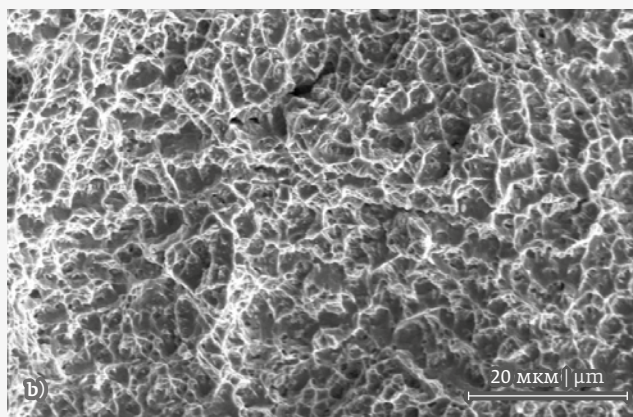
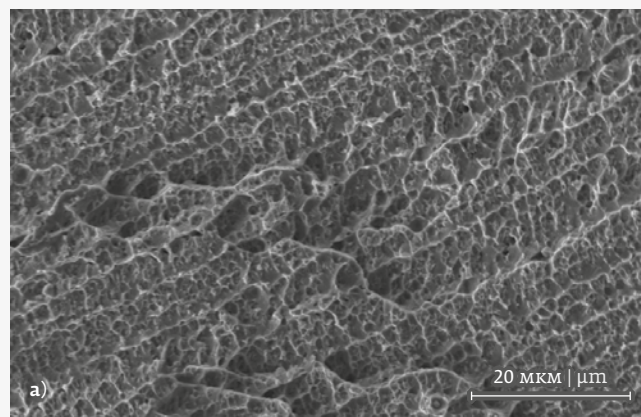


Рис. 5. Схематическое изображения распространения трещины в аддитивно сформированном сплаве Inconel 718 после применения дополнительной термической обработки: продольная ориентация (а); поперечная ориентация (b)
Fig. 5. Schematic representation of crack propagation in the additively formed Inconel 718 alloy after heat treatment: longitudinal orientation (a); transverse orientation (b)

- Cain V. et al. Crack propagation and fracture toughness of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2015; 5: 68–76. DOI: 10.1016/j.addma.2014.12.006.
- Lingenfelter A. Welding of Inconel alloy 718: A historical overview. *Superalloy*. 1989; 718: 673–683. DOI: 10.7449/1989/SUPERALLOYS_1989_673_683.
- Gaofeng T. et al. Cooling γ' precipitation behavior and strengthening in powder metallurgy superalloy FGH4096. *Rare Metals*. 2008; 27 (4): 410–417. DOI: 10.1016/S1001-0521(08)60154-0.
- Lomberg B. S., Ovsepyan S. V., Latyshev V. B. Sovremennye deformiruemye zharnoprochnye сплавы. *Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika S. T. Kishkina. Nauchnye idei S. T. Kishkina i sovremennoe materialovedenie*. – М.: Izd-vo VIAM NIC "Kurchatovskij institut" 2006: 75–84.
- Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Латышев В. Б. Современные деформируемые жаропрочные сплавы. *Труды международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика С. Т. Кишкина. Научные идеи С. Т. Кишкина и современное материаловедение*. – М.: Изд-во ВИАМ НИЦ «Курчатовский институт» 2006: 75–84.
- Radavich J. F. The physical metallurgy of cast and wrought alloy 718. *Superalloy*. 1989; 718 (33): 229–240. DOI: 10.7449/1989/Superalloys_1989_229_240.

АВТОРЫ

Рашковец Мария Владимировна, mrashkovets@mail.ru, м. н. с.,
 Научно-исследовательская лаборатория физико-химических технологий
 и функциональных материалов, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
 технический университет», Новосибирск, Россия.
 ORCID 0000-0002-4045-0722

in the areas of the partially dissolved Laves phase. Subsequent double aging at temperatures of 720°C and 620°C for 8 hours gives the strengthening γ' phase of typical cubic geometry and maximum size of about 1 μm . The mechanical properties of the as-deposited and heat-treated samples largely depend on the layer growth direction and dynamic force orientation. The difference between the longitudinal and transverse orientation is 23.4 J/cm². Provided that columnar structure saved after the industrial standard heat treatment of the additively formed nickel-base alloy Inconel 718, the increase 1.5 times of impact toughness is due to precipitation of strengthening γ' phase.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 19-38-90131 “Investigation of the regularities of fatigue and dynamic fracture of heat-resistant alloys obtained by additive manufacturing” (2019–2021).



Кислов Никита Геннадьевич, nikitakislov@bk.ru, инженер отдела исследования материалов Институт лазерных и сварочных технологий, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия.
ORCID 0000-0002-1103-5802

Никулина Аэлита Александровна, a.nikulina@corp.nstu.ru, д. т. н., научный сотрудник, Центр коллективного пользования «Структура, механические и физические свойства материалов», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия.
ORCID 0000-0001-9249-2273

Климова-Корсмик Ольга Геннадьевна, o.klimova@lts.ru, к. т. н., руководитель отдела исследования лазерных и сварочных технологий, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0000-0002-2619-8874

ВКЛАД АВТОРОВ

Рашковец Мария Владимировна: идея, планирование эксперимента, проведение эксперимента, обработка результатов, обсуждения, написание текста статьи; Кислов Никита Геннадьевич: идея, планирование эксперимента, проведение эксперимента; Никулина Аэлита Александровна: организация работы по оценке микроструктуры, предложения и замечания; Климова-Корсмик Ольга Геннадьевна: организация работы по выполнению механических испытаний, предложения и замечания.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конкурирующих финансовых интересов, а также отсутствует реальный или потенциальный конфликт интересов, имеющий отношение к результатам, описанным в данной статье.

The studies were carried out on the equipment of the Center for Collective Use “Structure, Mechanical and Physical Properties of Materials” NSTU No. 13.CKP.21.0034.

ABOUT AUTHORS

Rashkovets M., junior researcher, Research Laboratory of Physical and Chemical Technologies and Functional Materials, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
ORCID 0000-0002-4045-0722

Kislov N., Eng. of Materials Research Department, Institute of Laser and Welding Technologies, St. Petersburg Marine Technical University,
<http://en.ilwt-stu.ru/contacts>, St. Petersburg, Russia.
ORCID 0000-0002-1103-5802

Nikulina A., Dr. of Sc. (Eng.), Researcher, Shared Use Center «Structure, Mechanical and Physical Properties of Materials», Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.
ORCID 0000-0001-9249-2273

Klimova-Korsmik O., Cand. of Science (Eng.), Head of Materials Research Department, Institute of Laser and Welding Technologies, St. Petersburg Marine Technical University,
<http://en.ilwt-stu.ru/contacts>, St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0000-0002-2619-8874

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

Rashkovets M.: Conceptualization, planning an experiment, performing the experiment, characterizing the results, discussions, writing of the original draft; Kislov N.: Conceptualization, planning an experiment, performing the experiment; Nikulina A.: Supervision of microstructure test, editing; Klimova-Korsmik O.: Supervision of mechanical tests, editing.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



Металлообработка. Сварка – Урал

международная выставка технологий, оборудования, материалов для машиностроения, металлообрабатывающей промышленности и сварочного производства



PRO
EXPO

15–18 марта 2022
Екатеринбург

крупнейший
специализированный
региональный проект в России

(342) 264-64-27
egorova@expoperm.ru
www.metal-ekb.expoperm.ru

