

TRIBOTECHNICAL AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF POLYMERIC FRICTIONAL MATERIALS PROCESSED BY A PULSE HIGH FREQUENCY MAGNETIC FIELD

H. G. Anisovich¹, S. N. Bukharov², V. P. Sergienko², I. I. Filatova³

¹Physical–Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²V. A. Belyi Metal Polymer Research Institute, National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

³B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail:sergienko_vp@mail.ru

The mechanisms of transformation of the structure, mechanical and triboacoustic properties of polymer composite materials under the influence of a pulsed high-frequency magnetic field are discussed. The possibility of minimizing the noise of a friction pair due to the controlled displacement of the friction components of the spectrum in the range above 2 kHz was found.

УДК 669.245

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЭП741НП, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СЛС

Ф. А. Басков^{1,2}, Ж. А. Сентюрин^{1,2}, И. А. Логачев¹, А. И. Логачева¹, Е. А. Левашов²

¹АО «Композит», г. Королев, Россия, тел.: 8 (495) 513-23-89, e-mail: info@kompozit-mv.ru

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
тел.: 8 (495) 638-45-00, e-mail: levashov@shs.misis.ru

В работе представлены основные результаты исследований микроструктуры и свойств образцов из никелевого жаропрочного сплава ЭП741НП, полученных методом СЛС с различной ориентацией относительно плиты построения (0°, 45° и 90°). Изучено влияние угла наклона образцов на особенности формирования структуры, распределение дефектов и механические свойства при растяжении. Дополнительно исследовано влияние ГИП и ТО на эволюцию структуры и свойств СЛС-образцов. Установлено, что проведение ГИП и ТО способствует значительному увеличению механических свойств за счет устранения структурных дефектов и выделения упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы (Ni_3Al).

Введение. Селективное лазерное сплавление (СЛС) является одним из наиболее перспективных аддитивных методов изготовления деталей из никелевых сплавов для авиа- и ракетно-космической отрасли. Интерес к методу СЛС обусловлен рядом преимуществ перед традиционными технологиями, таких как возможность снижения веса деталей за счет топологической оптимизации, сокращение технологического цикла, снижение времени изготовления деталей, увеличение КИМ и др. [1–3]. На сегодняшний день актуальной задачей является разработка режимов СЛС и последующей постобработки, а также аттестация свойств наиболее используемых в современном двигателестроении жаропрочных никелевых сплавов. Одним из таких сплавов является ЭП741НП, который используется для производства дисков газотурбинных двигателей, работающих при температурах 400–750 °С [4].

Сущность метода СЛС заключается в послойном избирательном сплавлении порошкового материала лазерным источником. В процессе СЛС за счет высоких температурных градиентов и наличия преимущественного направления теплоотвода реализуется так называемый эпитаксиальный механизм роста [5, 6], в результате чего столбчатые макрозерна, ориентированные перпендикулярно плите построения, прорастают через несколько ванн расплава и могут достигать размеров свыше 1 мм. Формирование такого типа структуры приводит к анизотропии свойств материалов, синтезированных методом СЛС [6, 7].

Другой характерной особенностью аддитивных материалов является формирование в них высоких остаточных напряжений и дефектов в виде газовой пористости и единичных микротрещин. Для устранения перечисленных дефектов применяются операции горячего изостатического прессования (ГИП) и различных видов термических обработок [8, 9].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния угла наклона экспериментальных СЛС-образцов (0°, 45° и 90°) по отношению к плите построения на их микроструктуру и меха-

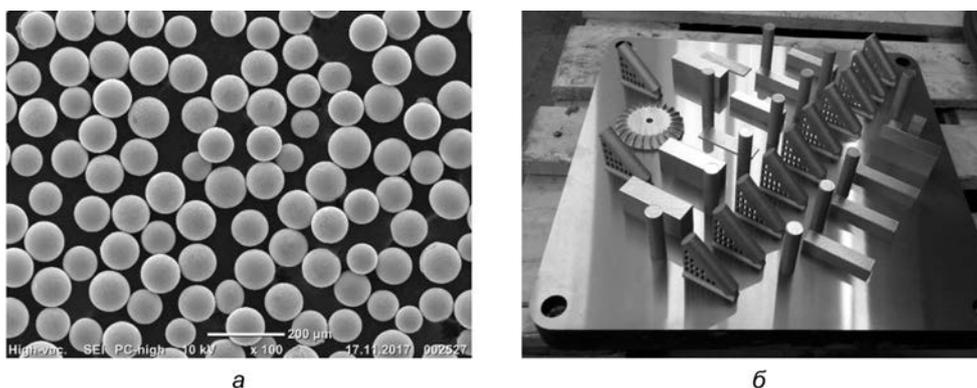


Рис. 1. Внешний вид исходного порошка из сплава ЭП741НП (а) и экспериментальных образцов (б), полученных методом СЛС

нические характеристики, а также оценка влияния последующих операций ГИП и ТО на устранение структурных дефектов и повышение механических свойств.

Материалы и методы исследования. В качестве исходного материала для процесса СЛС использовали сферический порошок из жаропрочного никелевого сплава марки ЭП741НП (рис. 1, а), полученный методом центробежного плазменного распыления в АО «Композит» (Россия). Состав сплава соответствует ГОСТ-Р-52802. Размер частиц порошка находился в интервале 20–64 мкм, при этом квантили распределения d_{20} , d_{50} и d_{90} составили 28,6 мкм, 37,9 и 53,5 мкм, соответственно. Средний размер частиц $D [4, 3] = 37,7$ мкм. Концентрация газовых примесей в порошке составляла 0,005 мас.% по кислороду и 0,001 мас.% по азоту. Насыпная плотность – 4,94 г/см³; текучесть – 12,5 с.

Экспериментальные образцы с различной ориентацией относительно платформы построения (0°, 45° и 90° – рис. 1, б) получены на промышленной установке СЛС с рабочей зоной 400×400×400 мм, оснащенной иттербиевым волоконным лазером мощностью 1 кВт. Процесс СЛС проводился в инертной среде аргона. Экспериментальные образцы, полученные методом СЛС, подвергались различным видам постобработки: ГИП, ТО, ГИП + ТО. ГИП и ТО по типу «закалка + старение» проводили по стандартным для сплава ЭП741НП режимам.

Структуру экспериментальных образцов исследовали методом оптической микроскопии (ОМ) на металлографическом микроскопе отраженного света AXIO Imager A1 фирмы CarlZeiss (Германия) и методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi S-3400N (Япония), оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром фирмы NORAN. Для выявления структуры образцов применяли травитель, состоящий из смеси соляной кислоты 100 мл, сернокислой меди 20 г и воды 100 мл. Твердость по Виккерсу определяли с использованием цифрового твердомера HVS-50 (Китай) при величине нагрузки 10 кг. Механические свойства образцов на растяжение определяли на цилиндрических образцах тип IV по ГОСТ-1497 на универсальной испытательной машине Schenk-Trebel RMC-100 (Германия). Для каждого типа образцов (0°, 45° и 90°) и каждого вида обработки (СЛС, СЛС + ГИП, СЛС + ТО, СЛС + ГИП + ТО) испытывалось по три статических образца (всего 36 шт.).

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлена структура поперечных сечений образцов, выращенных под углами 0°, 45° и 90° в состоянии после СЛС (рис. 2, а, в, д) и СЛС+ГИП+ТО (рис. 2, б, г, е). Все образцы имеют характерную столбчатую структуру, что хорошо видно на поперечном сечении образца, выращенного под углом 0° (рис. 2, а). В структуре образцов после СЛС обнаружены трещины, размер которых достигает до 250 мкм, и одиночные микропоры. Преимущественно трещины распространяются по границам зерен.

Применение ГИП и ТО способствует устранению трещин (рис. 2, б, г, е) и формированию выраженной зеренной структуры. Стоит отметить, что у образцов, полученных под углом 45° (рис. 2, в), размер зерна в поперечном сечении несколько больше, чем у образцов с ориентацией 90°. Это связано с тем, что в процессе СЛС рост зерен осуществляется в направлении преимущественного теплоотвода, поэтому у образцов, полученных под углом 45°, зерна сориентированы относительно оси Z со смещением в сторону наклона образца. На структуре поперечного сечения образца, сориентированного под углом 0°, после ГИП и ТО наблюдаются вытянутые зерна (рис. 2, б), направление которых совпадает с направлением столбчатых макрозерен после СЛС (рис. 2, а). Таким образом, можно заключить, что проведение комплексной

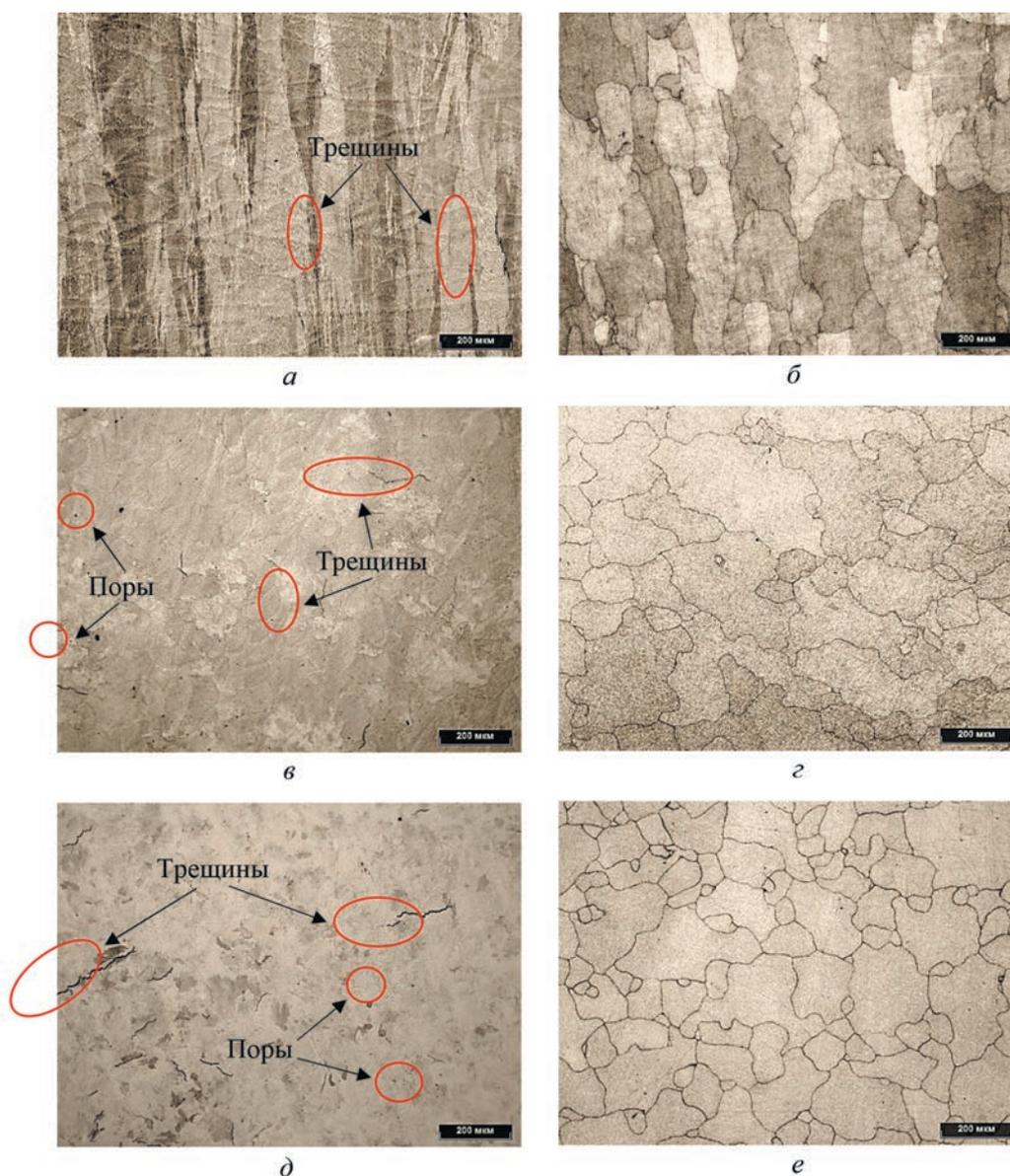


Рис. 2. Макроструктура образцов, ориентированных к плите построения под углами 0° (а, б), 45° (в, з) и 90° (д, е), в состоянии СЛС (а, в, д) и СЛС+ГИП+ТО (б, з, е)

постобработки, сочетающей ГИП и ТО, позволяет устранить большую часть дефектов структуры, однако не приводит к полному устранению структурной анизотропии.

Микроструктура СЛС-образца в продольном и поперечном сечениях представлена на рис. 3, а, б на примере образца, выращенного под углом 90° к плите построения. Структура в продольном сечении (рис. 3, а) представляет собой вытянутые субзерна (столбчатые зерна), рост которых преимущественно направлен в сторону наибольшего теплоотвода. В поперечном сечении наблюдается смешанный тип микроструктуры, имеющий элементы столбчатой и мозаичной структур (рис. 3, б). Формирование такой структуры объясняется тем, что в процессе прорастания субзерен (желтые линии) через границу ванны расплава (красная линия) направление их роста может либо остаться прежним, либо измениться на 90° [9].

Микроструктура после ГИП (рис. 4, а) состоит из твердого раствора на основе никеля (γ -фаза), упрочняющей интерметаллидной фазы Ni_3Al (γ' -фаза) кубической формой и карбидной фазы $(Nb,Ti)C$. При γ' -фаза выделяется в виде включений размером от 0,5 до 4 мкм, неравномерно распределенных в объеме материала. Выявлено, что применение ГИП способствует уменьшению пористости в образцах с 0,3 об.% до 0,027 об.%. Микроструктура СЛС-образцов после ТО и после комплексной обработки ГИП+ТО качественно не отличается (рис. 4, б). Прове-

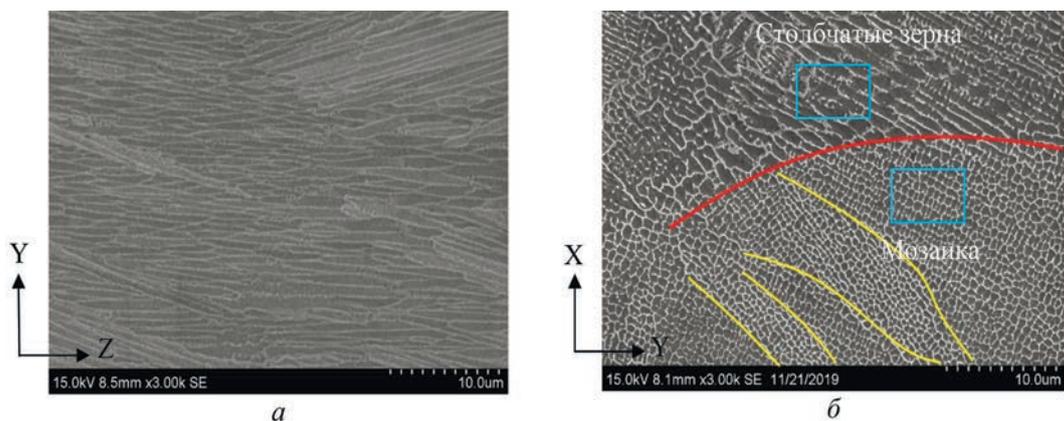


Рис. 3. Микроструктура продольного (а) и поперечного (б) сечения СЛС-образца из сплава ЭП741НП, выращенного под углом 90°

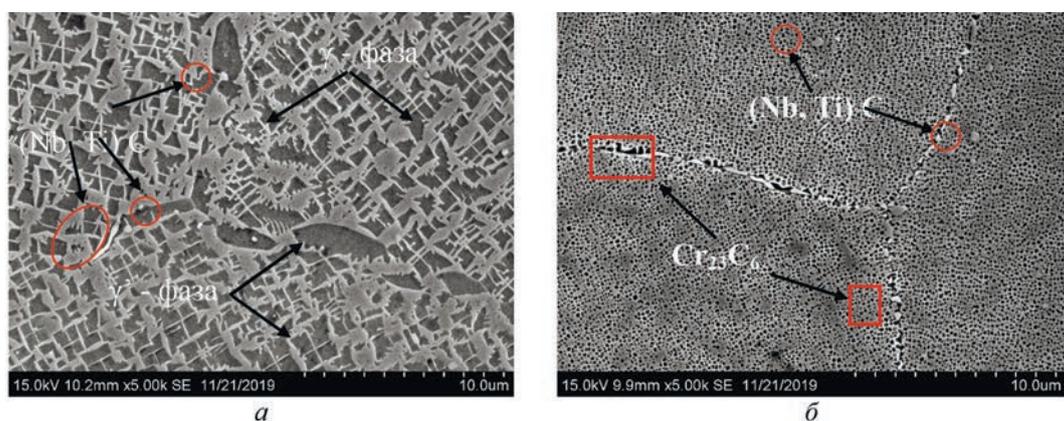


Рис. 4. Микроструктура СЛС-образцов из сплава ЭП741НП после ГИП (а) и ТО (б)

дение ТО по типу «закалка + старение» приводит к равномерному выделению мелкодисперсной γ' -фазы, размеры которой не превышают 400 нм. Кроме того, по границам зерен помимо (Nb,Ti) C выделяется карбидная фаза $Cr_{23}C_6$.

В таблице приведены результаты измерений твердости по Виккерсу поперечных сечений СЛС-образцов в зависимости от угла построения и вида постобработки. Проведение ГИП способствует некоторому снижению уровня твердости после СЛС, что связано со снятием остаточных термических напряжений, а также рекристаллизацией субзеренной структуры. Проведение термообработки как для образцов в состоянии СЛС, так и для образцов в состоянии СЛС+ГИП, способствует увеличению твердости примерно до одного уровня, что связано со структурными преобразованиями в материале, в первую очередь с увеличением количества твердой интерметаллидной γ' -фазы, а также увеличения количества карбидных фаз.

Твердость по Виккерсу образцов из сплава ЭП741НП

Угол наклона	Твердость, HV			
	СЛС	СЛС+ГИП	СЛС+ТО	СЛС+ГИП+ТО
0°	398 ± 13,2	388 ± 16,2	451 ± 14,5	454 ± 9,9
45°	422 ± 26	403 ± 35	445 ± 19	449 ± 17
90°	410 ± 7	387 ± 17	452 ± 58	443 ± 39

Результаты механических испытаний на растяжение СЛС-образцов в зависимости от их ориентации и типа обработки представлены на рис. 5. Установлено, что в состоянии СЛС, максимальными прочностными характеристиками обладает образец, полученный под углом 90°. Данный эффект вероятно связан как с ориентацией зерен, так и с характером распределения

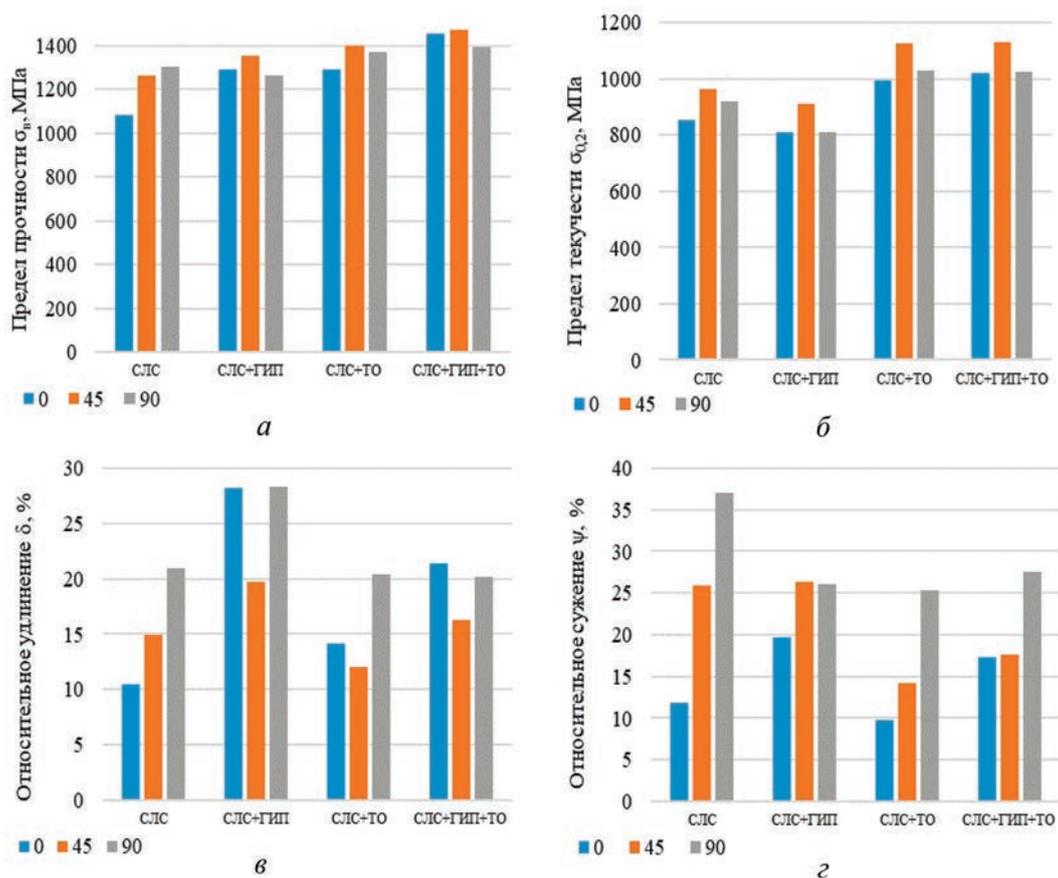


Рис. 5. Механические свойства образцов в зависимости от угла наклона и вида обработки: а – предел прочности; б – предел текучести; в – относительное удлинение; г – относительное сужение

дефектов в образце. Так, в образцах с ориентацией 0° столбчатые макрозерна и трещины, которые преимущественно располагаются по границам зерен, перпендикулярны направлению растяжения образцов, в связи с чем именно эти образцы демонстрируют минимальный уровень механических свойств.

Проведение ГИП и ТО способствует некоторому выравниванию свойств образцов с различной ориентацией, что в первую очередь связано с устранением дефектов структуры. При этом стоит отметить высокие показатели σ_v и $\sigma_{0,2}$ у образцов, полученных под углом 45° , независимо от вида постобработки. Данный эффект вероятно связан с тем, что в процессе получения этого типа образцов происходит постоянное смещение лазера, которое препятствует формированию зерен большого размера (в вертикальном сечении). Поэтому проведение ГИП и ТО для образцов с ориентацией 45° вызывает более равномерное распределение зерен по размерам, что, в свою очередь, положительно отражается на прочностных характеристиках.

Выводы

1. Выявлено, что СЛС-образцы характеризуются столбчатой макроструктурой, ориентированной в направлении преимущественного теплоотвода, и имеют дефекты в виде трещин и микропор.

2. Непосредственно после СЛС образцы отличаются достаточно сильной анизотропией механических свойств, при этом максимальными характеристиками обладают образцы с ориентацией 90° , а минимальными – образцы с ориентацией 0° , что связано с направлением роста столбчатых зерен и особенностями распределения трещин в объеме образцов.

3. Проведение ГИП способствует устранению дефектов в виде трещин и пор, что приводит к уменьшению уровня пористости в 10 раз.

4. Проведение ТО, а также ГИП в сочетании с ТО приводит к увеличению механических характеристик за счет выделения упрочняющей γ' -фазы, однако не вызывает полное устранение

структурной анизотропии, унаследованной от СЛС-процесса. Таким образом, некоторая анизотропия механических свойств сохраняется после всех видов постобработки, однако уровень анизотропии уменьшается за счет устранения дефектов и рекристаллизации структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного Фонда (Проект № 19-79-10226).

Литература

1. Gibson, I. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. W. Rosen // Stucker Springer Science & Business Media. – 2009. – 484 p.
2. Najmon, J. C. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry / J. C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry. – 2019. – P. 7–31.
3. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review / A. Gisario [et al.] // Journal of Manufacturing Systems. – 2019. – Vol. 53. – P. 124–149.
4. Логунов, А. В. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин / А. В. Логунов, Ю. Н. Шмотин. – М. : Наука и технологии, 2013. – 264 с.
5. Hosseini, E. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718 / E. Hosseini, V. A. Popovich // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 30. – P. 100877.
6. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting / E. Chlebus [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 639. – P. 647–655.
7. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review / Y. Kok [et al.] // Materials & Design. – 2017. – Vol. 139.
8. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting / W. Tillmann [et al.] // Additive Manufacturing. – 2017. – Vol. 13. – P. 93–102.
9. Chen Effect of heat treatment on microstructure evolution of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting / Li Xing [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 764. – P. 639–649.

RESEARCH OF ANISOTROPY OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF EP741NP NICKEL ALLOY OBTAINED BY SLM METHOD

F. A. Baskov^{1,2}, Zh. A. Sentyurina^{1,2}, I. A. Logachev^{1,2}, A. I. Logacheva¹, E. A. Levashov²

¹JSC 'Kompozit', Russia, e-mail: info@kompozit-mv.ru

²National University of Science and Technology 'MISIS', Russia, e-mail: levashov@shs.misis.ru

The paper presents the main results of studies of the microstructure and properties of samples of the EP741NP nickel alloy, obtained by the SLM method with different orientations relative to the construction plate (0, 45, and 90 °). The influence of the angle of inclination of the samples on the features of the formation of the structure, the distribution of defects, and mechanical properties under tension was studied. Additionally, the influence of HIP and HT on the evolution of the structure and properties of SLM samples was investigated. It was established that the conduct of HIP and HT contributes to a significant increase in mechanical properties by eliminating structural defects and isolating the hardening intermetallic γ' phase (Ni_3Al).

УДК 621.762

ИССЛЕДОВАНИЕ УПЛОТНЯЕМОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГРАНУЛ С УДАЛЯЕМОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

А. И. Важнова, О. Л. Сморгыо, А. И. Марукович

Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа НАН Беларуси,
г. Минск, Беларусь, тел.: +375(17) 292-66-39, факс: +375(17) 210-05-74

Исследован процесс получения высокопористого ячеистого материала на основе титана из композиционных гранул с удаляемой сердцевинной. Ключевым процессом в этой технологии является уплотнение композиционных гранул с сердцевинной из карбамида. Установлено, что для получения бездефектной заготовки давление прессования должно составлять 500–550 МПа.