

УДК 620.179.12

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-42-49

Исследование формирования структуры и свойств в заготовке из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, полученной по технологии горячего изостатического прессования*

А. А. Хлыбов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Д. А. Рябов, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

А. А. Соловьев, студент, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Д. И. Васянкин, студент, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

А. А. Шуянова, студент, Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

А. А. Демченко, АО «Русполимет», Кулебаки, Россия

Известно, что технология горячего изостатического прессования позволяет снизить остаточную пористость и повысить уровень физико-механических характеристик изделий, получаемых методами порошковой металлургии. В современном авиа- и ракетостроении применяются жаропрочные гетерофазные никелевые сплавы, которые получены с использованием гранульной металлургии. Данный материал незаменим при создании дисков газотурбинных двигателей, которые входят в состав ротора турбины и служат для установки рабочих лопаток. Получение беспористого изделия из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП по технологии горячего изостатического прессования позволит повысить ресурс работы дисков турбины газотурбинных двигателей, что является актуальной задачей в настоящее время. Целью работы является изучение структуры и физико-механических свойств заготовки из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, полученной методом горячего изостатического прессования при температуре 1150 °С. Исходным материалом для получения заготовки является металлический порошок жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, полученный методом газовой атомизации и имеющий фракционный состав 20...50 мкм.

Показано, что процесс горячего изостатического прессования при температуре 1150 °С позволяет получить оптимальное сочетание физико-механических свойств. На основании полученных изображений частиц порошка и микроструктуры заготовки определена форма частиц исследуемого порошка, основная категория зернистости порошка и проведен цифровой анализ пористости исследуемой заготовки в программном комплексе Thixomet Pro. Также проведена оценка изменения плотности и твердости по сечению заготовки.

Установлено, что при температуре горячего изостатического прессования 1150 °С средняя пористость незначительна и составляет 0,1 %, однако по мере отдаления от края заготовки к ее центру наблюдается увеличение содержания пор, размер которых лежит в диапазоне 1...20 мкм. Показано, что при технологическом процессе горячего изостатического прессования наблюдается арочный эффект, следствием которого являются завышенные характеристики микротвердости и плотности у края заготовки.

Ключевые слова: горячее изостатическое прессование, жаропрочный никелевый сплав ЭП741НП, металлографический анализ, твердость, плотность.

Введение

Проблемой деталей, изготовленных методами гранульной металлургии, является наличие микропор [1, 2]. Данные структурные несовершенства существенно снижают физико-механические характеристики. Технология горячего изостатического прессования (ГИП) позволяет устранить данную

проблему за счет снижения пористости в получаемых изделиях [3–5]. Однако неправильно выбранные параметры ГИП (температура и давление) могут оказать негативное влияние на формирование структуры и вызвать образование пор.

© Хлыбов А. А., Рябов Д. А., Соловьев А. А., Васянкин Д. И., Шуянова А. А., Демченко А. А., 2023

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-19-00332-П «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

ГИП представляет собой процесс, в котором обрабатываемый материал подвергается комбинированному воздействию высокого давления и высокой температуры в течение определенного времени. Это позволяет достичь компактирования обрабатываемого материала [6, 7]. Отличительной чертой ГИП является одновременность протекания двух процессов – механического уплотнения и спекания массы порошка. Увеличение пластичности порошка при повышенных температурах обеспечивает значительно более интенсивное уплотнение частиц в ходе этих процессов. Происходит перемещение частиц, ведущее к механическому разрыву поверхностных пленок, и таким образом возникают новые чистые поверхности. Под действием изостатического давления и высокотемпературной диффузии они начинают взаимодействовать более интенсивно [8–10].

Известно, что заготовки и готовые изделия, полученные методом ГИП, обладают повышенной усталостной прочностью, высоким сопротивлением коррозии, а также увеличенным ресурсом работы [11].

В отечественном авиа- и ракетостроении для создания дисков и других компонентов газотурбинных двигателей (ГТД) широко применяются жаропрочные никелевые сплавы, получаемые методами гранульной металлургии [12]. Применение таких материалов обусловлено их высоким уровнем длительной и кратковременной прочности в рабочем диапазоне температур, стабильностью структуры и фазового состава и низкой чувствительностью к концентраторам напряжений [13]. Сплав ЭП741НП имеет уникальные физико-механические свойства при комнатной температуре и температурах эксплуатации (450...750 °С) и наиболее полно соответствует указанному перечню свойств,

поэтому применяется для изготовления дисков турбины ГТД [14].

Наиболее важные факторы, которые обуславливают применение технологии ГИП при производстве особо сложных деталей и узлов из жаропрочных и труднодеформируемых никелевых сплавов отражены в работах [15–19].

Целью настоящей работы является исследование структуры и физико-механических свойств заготовки из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, полученной по технологии ГИП при температуре 1150 °С.

Материалы и методы исследования

В качестве материала для исследования был выбран жаропрочный никелевый сплав ЭП741НП. Химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав сплава ЭП741НП, в % мас.

Table 1. Chemical composition of the EP741NP alloy, in % by weight

Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	W
1,71	8,90	0,86	17,56	60,74	2,95	4,39	1,52

Полученный методом газовой атомизации порошок ЭП741НП имеет фракцию 20...50 мкм, насыпную плотность 5,68 г/см³, текучесть 2,3 г/с и удельную поверхность 446 см²/г.

В качестве оснастки для изготовления цилиндрических образцов использовались капсулы (полые цилиндры) из стали 20 (ГОСТ 1050–2013). Капсулы имеют цилиндрическую форму, длину 200 мм, диаметр 140 мм и толщину стенки 2 мм.

Из заготовки, полученной методом ГИП ($T = 1150$ °С, $P = 120$ МПа) были вырезаны 7 образцов от края до центра с размерами 10×10×10 мм для оценки изменения плотности и микротвердости. Схема вырезки образцов представлена на рисунке 1.

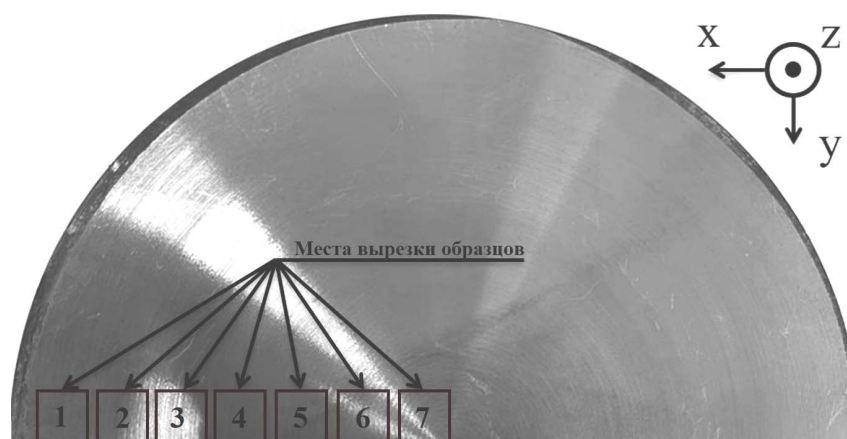


Рис. 1. Заготовка из сплава ЭП741НП после ГИП

Fig. 1. The billet made of EP741 alloy after the HIP

Металлографический анализ образцов проводился по стандартной схеме: шлифовка, полировка и последующее травление в растворе Васильева ($\text{HCl} 25 \text{ см}^3$, $\text{H}_2\text{SO}_4 12,5 \text{ см}^3$, $\text{H}_2\text{O} 25 \text{ см}^3$, $\text{CuSO}_4 5 \text{ г}$). Изображения частиц порошка, а также микроструктуры исследуемых образцов получены при помощи оптического микроскопа Keyence VHX-1000. На основании полученных изображений был выполнен анализ пористости, определен размер частиц порошка и рассчитан фактор формы, представляющий собой отношение максимального линейного размера проекции частицы (l_{\max}) к ее минимальному размеру

$$(l_{\min}) \text{ в соответствии с ГОСТ 25849-83 } \left(\frac{l_{\max}}{l_{\min}} \right)$$

с помощью программы Thixomet PRO. В программу загружалось изображение микроструктуры и производился цифровой анализ.

Для определения плотности требуется сначала провести взвешивание образцов на воздухе, а затем – в дистиллированной воде. Взвешивание выполнялось с использованием высокоточных аналитических весов ВЛА-200 при температуре окружающего воздуха $21 \text{ }^\circ\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 20018-74.

Плотность образцов, г/см^3 , вычислялась по формуле

$$\rho = \frac{m_1 \rho_1}{m_2}, \quad (1)$$

где m_1 – масса испытуемого образца, г; ρ_1 – плотность дистиллированной воды на воздухе, г/см^3 ; m_2 – масса объема дистиллированной воды, вытесненной образцом, помещенным в дистиллированную воду, равная разности масс образца, взвешенного на воздухе, и образца, взвешенного в воде, г.

Для определения микротвердости использовался микротвердомер ИТВ-1-АМ при нагрузке 1 кГс и времени выдержки 15 с. Измерение микротвердости проводилось по всему сечению заготовки.

Анализ результатов экспериментальных исследований

В ходе исследования было проанализировано более 800 частиц порошка сплава ЭП741НП в программном комплексе Thixomet PRO (рис. 2). Для проведения анализа необходимо настроить калибровку, выделить частицы порошка, определить размерные интервалы. Выходными данными анализа является гистограмма, которая

отражает распределение размера частиц исследуемого материала.

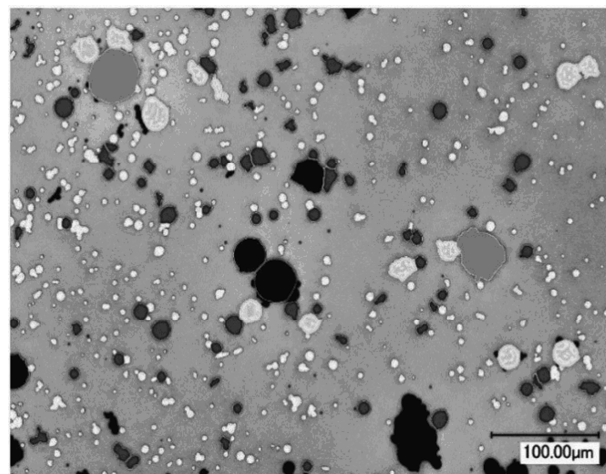


Рис. 2. Анализ изображения частиц порошка сплава ЭП741НП

Fig. 2. Image analysis of EP741NP alloy powder particles

На основании полученных статистических данных была построена гистограмма распределения размера частиц порошка сплава ЭП741НП в мкм (рис. 3), а также получено графическое представление частотного распределения, разбитого по интервалам (гистограмма), отражающее степень неравноосности исследуемых частиц порошка сплава ЭП741НП (рис. 4).

Цифровая обработка изображений в программном комплексе Thixomet PRO показала, что типовая форма частиц исследуемого порошка сферическая (53,6 %) и округлая (45,7 %), а основная категория зернистости порошков тонкая и средняя (10...100 мкм).

На рисунке 5 представлены результаты анализа измерения остаточной пористости на основании полученных микроструктур образцов, вырезанных из заготовки.

Для описания формы частиц в соответствии с ГОСТ 25849-81 используется понятие фактора формы, которое представляет собой отношение максимальной проекции линейного размера частицы порошка l_{\max} к ее минимальному размеру l_{\min} . Фактор формы l_{\max}/l_{\min} используется для характеристики степени неравноосности частиц. Этот параметр является одним из важнейших в технологиях ГИП, так как влияет на плотность материала при засыпке в капсулу, а также оказывает влияние на механизм спекания порошка.

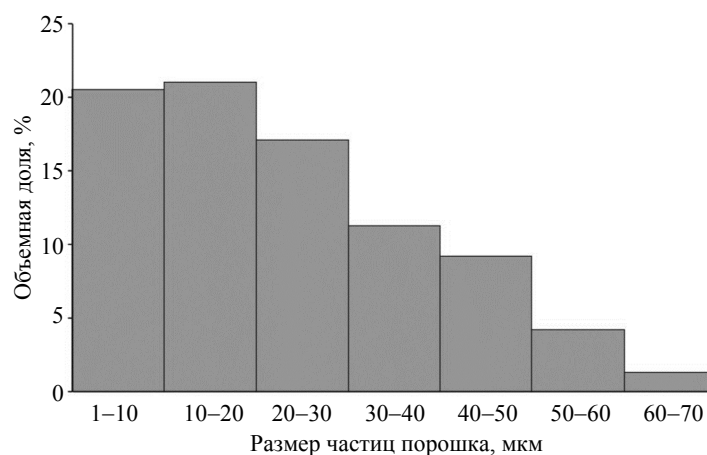


Рис. 3. Гистограмма распределения размера частиц порошка ЭП741НП

Fig. 3. Histogram of the particle size distribution of EP741NP powder

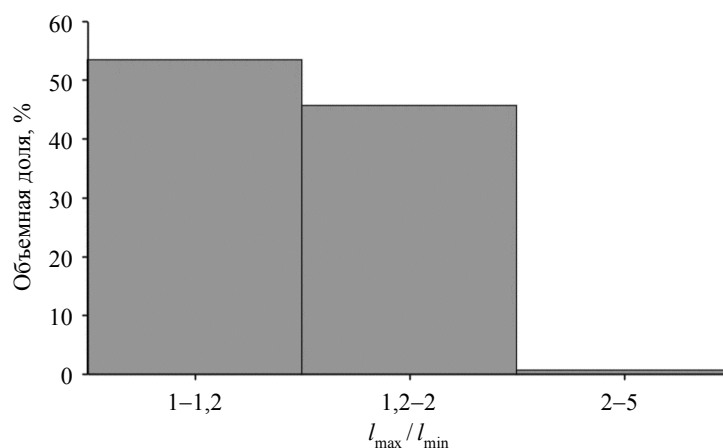


Рис. 4. Фактор формы l_{max}/l_{min} частиц порошка ЭП741НП

Fig. 4. Shape factor l_{max}/l_{min} of EP741NP powder particles

Твердый раствор на основе никеля (γ -фаза) является основной фазой в микроструктуре заготовки из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, полученной методом ГИП при $T = 1150^\circ\text{C}$. Помимо твердого раствора структура представлена упрочняющими интерметаллидными фазами типа Ni_3Me (γ' -фаза), первичными карбидами типа $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ и частицами вторичных карбидов типа Me_{23}C_6 [20, 21]. Видно, что размер зерен матрицы (γ -фазы) соответствует размерам гранул, используемых при газостатировании.

На основании цифрового анализа была построена зависимость, отражающая изменение остаточной пористости по сечению заготовки (рис. 6).

Установлено, что по мере отдаления от края заготовки к ее центру наблюдается увеличение содержания пор, размер которых лежит в диапазоне 1...20 мкм. Наличие пор преимущественно

в центре заготовки объясняется недостаточным давлением, температурой и временем выдержки при газостатировании.

В ходе работы были получены зависимости изменения плотности (рис. 7, а) и микротвердости (рис. 7, б) по сечению исследуемой заготовки.

Анализируя приведенные зависимости, можно сказать, что край заготовки имеет наибольшие значения плотности и микротвердости, что объясняется арочным эффектом: при совместном действии высоких температур и давлений при газостатировании образуются заметно упрочненные участки, или арки, не полностью передающие давление внутренним областям. В результате этого на внешней части заготовки диффузионные процессы протекают быстрее по сравнению с внутренними частями заготовки, образуется беспористая структура, обладающая повышенными физико-механическими характеристиками.

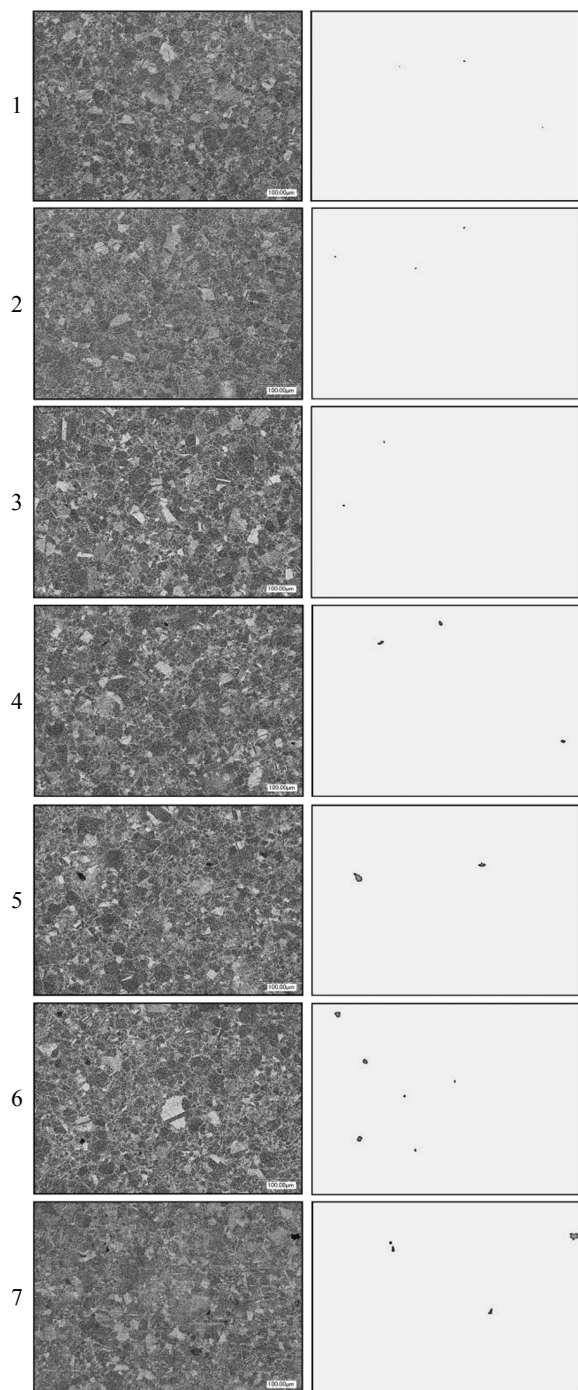


Рис. 5. Исходные и проанализированные микро-структуры образцов, вырезанных из заготовки, полученной по технологии ГИП при $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\times 500$): 1 – 0...10 мм (край заготовки); 2 – 10...20 мм; 3 – 20...30 мм; 4 – 30...40 мм; 5 – 40...50 мм; 6 – 50...60 мм; 7 – 60...70 мм (центр заготовки)

Fig. 5. Initial and analyzed microstructures of samples cut from the workpiece obtained by the HIP technology at $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\times 500$): 1 – 0...10 mm (the edge of the workpiece); 2 – 10...20 mm; 3 – 20...30 mm; 4 – 30...40 mm; 5 – 40...50 mm; 6 – 50...60 mm; 7 – 60...70 mm (the center of the workpiece)

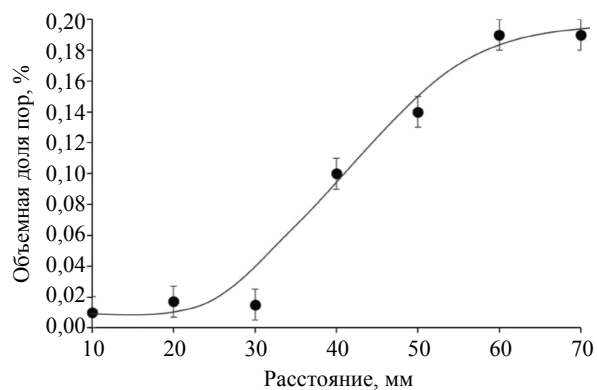
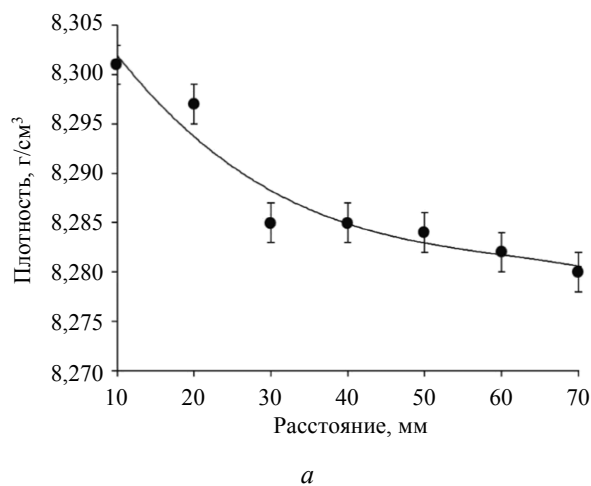
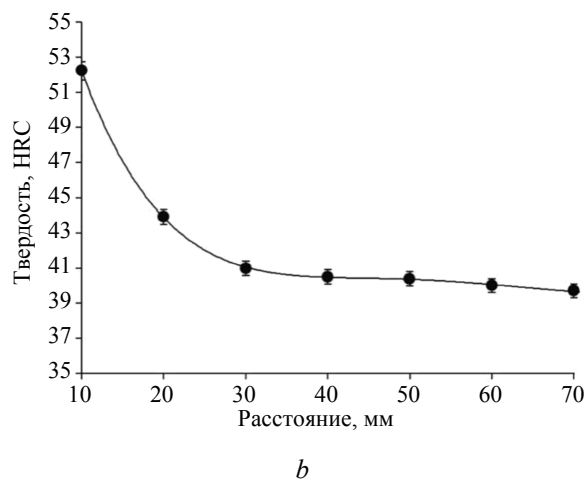


Рис. 6. Изменение пористости по сечению заготовки из сплава ЭП741НП

Fig. 6. Porosity change along the cross section of the billet made of EP741NP alloy



a



b

Рис. 7. Распределение физико-механических свойств по сечению заготовки из сплава ЭП741НП: a – плотности, b – твердости

Fig. 7. Distribution of physical and mechanical properties over the cross section of the workpiece made of EP741NP alloy: a - density, b - hardness

Выводы

1. Показано, что заготовка из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, полученная методом ГИП ($T = 1150$ °С, $P = 120$ МПа), обладает неравномерным распределением (градиентом) плотности и твердости по сечению. Снижение физико-механических свойств связано, по-видимому, с увеличением пористости по мере отдаления от края заготовки к ее центру.

2. Цифровой анализ изображений частиц порошка и микроструктур заготовки из сплава ЭП741НП, полученной методом ГИП при $T = 1150$ °С в программном комплексе Thixomet Pro, показал, что типовая форма частиц исследуемого порошка сферическая (53,6 %) и округлая (45,7 %), а основная категория зернистости порошков тонкая и средняя (10...100 мкм).

3. Установлено, что по мере отдаления от края заготовки к ее центру наблюдается увеличение содержания пор, размер которых лежит в диапазоне 1...20 мкм.

Библиографические ссылки

1. Lee J.U., Kim Y.K., Seo S.M., Lee K.A. (2022) Effects of hot isostatic pressing treatment on the microstructure and tensile properties of Ni-based superalloy CM247LC manufactured by selective laser melting. *Material Science and Engineering*, 2022, vol. 841, p. 143083.
2. Changhao P., Yuan H., Li B., Ma S. (2022) Anisotropic damage evolution and modeling for a nickel-based superalloy built by additive manufacturing. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, vol. 263, p. 108450.
3. Rutter B., Galilea I.L., Theisen W. (2020) An Integrated HIP Heat-Treatment of a Single Crystal Ni-Base Superalloy. *Superalloys*, 2020, pp. 391-399.
4. Teng Q., Xie Y., Sun S., Xue P., Long A., Wu T., Cai C., Guo J., Wei Q. (2022) Anisotropic damage evolution and modeling for a nickel-based superalloy built by additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 909, p. 164668.
5. Cai C., Pan K., Teng Q., Gao X., Song B., Liu J., Wei Q., Zhou K., Shi Y. (2019) Simultaneously enhanced strength and ductility of FGH4097 nickel-based alloy via a novel hot isostatic pressing strategy. *Material Science and Engineering*, A, 2019, vol. 760, pp. 19-25.
6. Liu T., Shi K., Zhao J., Liu S., Zhang Y., Liu H., Chen X., Mei X. (2023) Effect of hot isostatic pressing processing parameters on microstructure and properties of Ti60 high temperature titanium alloy. *China Foundry*, 2023, vol. 20, pp. 49-56.
7. Khomutov M.G., Potapkin P., Cheverikin V.V., Petrovskiy P., Travyanov A., Logachev I., Sova A., Smurov I. (2020) Effect of hot isostatic pressing on structure and properties of intermetallic NiAl-Cr-Mo alloy produced by selective laser melting. *Intermetallics*, 2020, vol. 120, p. 106766.
8. Kaplanskii Yu.Yu., Zaitsev A.A., Levashov E.A., Loginov P.A., Sentyurina Zh.A. (2018) NiAl based alloy produced by HIP and SLM of pre-alloyed spherical powders. Evolution of the structure and mechanical behavior at high temperatures. *Materials Science and Engineering*, A, 2018, vol. 717, pp. 48-59.
9. Lu F., Li L., Antonov S., Zheng Y., Fraser H.L., Wang D., Zhang J., Feng Q. (2020) Effect of Re on Long-Term Creep Behavior of Nickel-Based Single-Crystal Superalloys for Industrial Gas Turbine Applications. *Superalloys*, 2020, pp. 218-227.
10. Влияние технологии ГИП на структуру и свойства никелевого сплава ВЖ159 / А. А. Хлыбов, Е. С. Беляев, А. Д. Рябцев, С. С. Беляева, Ю. А. Гетмановский, П. М. Явтушенко, Д. А. Рябов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2021. Т.19, № 3. С. 75–83.
11. Yunsong Zhao, Siliang He, Longfei Li (2022) Application of Hot Isostatic Pressing in Nickel-Based Single Crystal Superalloys. *Crystals*, 2022, vol. 12, pp. 805-822.
12. Goel S., Mehtani H., Yao S.W., Samajdar I., Klement U., Joshi S.V. (2020) As-Built and Post-treated Microstructures of an Electron Beam Melting (EBM) Produced Nickel-Based Superalloy. *Metallurgical and Materials Transactions*, A, 2020, vol. 51, pp. 6546-6559.
13. Balachandramurthi A.R., Moverare J.J., Dixit N., Deng D., Pederson R. (2019) Microstructural influence on fatigue crack propagation during high cycle fatigue testing of additively manufactured Alloy 718. *Acta Materialia*, 2019, vol. 168, pp. 287-298.
14. Sentyurina Zh.A., Baskiv F.A., Loginov P., Kaplanskii Y., Mishukov A.V., Logachev I.A., Bychkova M.Ya., Levashov E.A., Logacheva A.I. (2021) The effect of hot isostatic pressing and heat treatment on the microstructure and properties of EP741NP nickel alloy manufactured by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 37, p. 101629.
15. Haocheng Zhang, Anqiang Wang, Zhixun Wen, Zhufeng Yue, Chengjiang Zhang (2016) Effects of Hot Isostatic Pressing (HIP) on Microstructure and Mechanical Properties of K403 Nickel-Based Superalloy. *HighTemp. Proc.*, 2016, vol. 35, pp. 463-471.
16. Некоторые технологические аспекты производства заготовок методом горячего изостатического прессования капсул с гранулами жаропрочных никелевых сплавов / А. В. Волков, А. Г. Евгенов, В. А. Игнатов, И. Р. Чуманов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2021. № 1. С. 25–30.
17. Микроструктура и механические свойства никелевого высокопрочного сплава ВЖ172, полученного методом горячего изостатического прессования гранул / И. С. Мазалов, А. М. Волков, Б. С. Ломберг, Е. Б. Чабина // Труды ВИАМ. 2022. № 9. С. 15–27.
18. Особенности производства заготовок дисков ГТД из гранул высокожаропрочных никелевых сплавов / А. М. Волков, Д. А. Карягин, М. Н. Летников, М. М. Бакрадзе, А. С. Перевозов // Металлург. 2020. № 4. С. 75–80.

19. Шестаков А. В., Карашаев М. М., Дмитриев Н. С. Технологические пути создания композиционных материалов на основе жаропрочных тугоплавких соединений (обзор) / Труды ВИАМ. 2021. № 8. С. 12–20.

20. Определение химического состава частиц основных фаз в изделиях из гранулируемого никелевого жаропрочного сплава ЭП741НП / Д. В. Зайцев, С. В. Сбитнева, Л. Б. Бер, А. В. Заводов // Труды ВИАМ. 2016. № 9. С. 61–71.

21. Xu J., Gruber H., Boyd R.D., Jiang S., Peng R.L., Moverare J.J. (2020) On the strengthening and embrittlement mechanisms of an additively manufactured Nickel-base superalloy. *Materialia*, 2020, p. 100657.

References

1. Lee J.U., Kim Y.K., Seo S.M., Lee K.A. (2022) Effects of hot isostatic pressing treatment on the microstructure and tensile properties of Ni-based superalloy CM247LC manufactured by selective laser melting. *Material Science and Engineering, A*, 2022, vol. 841, p. 143083.

2. Changhao P., Yuan H., Li B., Ma S. (2022) Anisotropic damage evolution and modeling for a nickel-based superalloy built by additive manufacturing. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, vol. 263, p. 108450.

3. Rutter B., Galilea I.L., Theisen W. (2020) An Integrated HIP Heat-Treatment of a Single Crystal Ni-Base Superalloy. *Superalloys*, 2020, pp. 391-399.

4. Teng Q., Xie Y., Sun S., Xue P., Long A., Wu T., Cai C., Guo J., Wei Q. (2022) Anisotropic damage evolution and modeling for a nickel-based superalloy built by additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, vol. 909, p. 164668.

5. Cai C., Pan K., Teng Q., Gao X., Song B., Liu J., Wei Q., Zhou K., Shi Y. (2019) Simultaneously enhanced strength and ductility of FGH4097 nickel-based alloy via a novel hot isostatic pressing strategy. *Material Science and Engineering, A*, 2019, vol. 760, p. 19-25.

6. Liu T., Shi K., Zhao J., Liu S., Zhang Y., Liu H., Chen X., Mei X. (2023) Effect of hot isostatic pressing processing parameters on microstructure and properties of Ti60 high temperature titanium alloy. *China Foundry*, 2023, vol. 20, pp. 49-56.

7. Khomutov M.G., Potapkin P., Cheverikin V.V., Petrovskiy P., Travyanov A., Logachev I., Sova A., Smurov I. (2020) Effect of hot isostatic pressing on structure and properties of intermetallic NiAl-Cr-Mo alloy produced by selective laser melting. *Intermetallics*, 2020, vol. 120, p. 106766.

8. Kaplanskii Yu.Yu., Zaitsev A.A., Levashov E.A., Loginov P.A., Sentyurina Zh.A. (2018) NiAl based alloy produced by HIP and SLM of pre-alloyed spherical powders: Evolution of the structure and mechanical behavior at high temperatures. *Materials Science and Engineering, A*, 2018, vol. 717, pp. 48-59.

9. Lu F., Li L., Antonov S., Zheng Y., Fraser H.L., Wang D., Zhang J., Feng Q. (2020) Effect of Re on Long-Term Creep Behavior of Nickel-Based Single-Crystal Superalloys for Industrial Gas Turbine Applications. *Superalloys*, 2020, pp. 218-227.

10. Xlybov A.A., Belyaev E.S., Ryabcev A.D., Belyaeva S.S., Getmanovskij Yu.A., Yavtushenko P.M., Ryabov D.A. (2021) [Influence of the HIP technology on the structure and properties of the nickel alloy VJ 159]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2021, vol. 3, pp. 75-83 (in Russ.).

11. Yunsong Zhao, Siliang He, Longfei Li (2022) Application of Hot Isostatic Pressing in Nickel-Based Single Crystal Superalloys. *Crystals*, 2022, vol. 12, pp. 805-822.

12. Goel S., Mehtani H., Yao S.W., Samajdar I., Klement U., Joshi S.V. (2020) As-Built and Post-treated Microstructures of an Electron Beam Melting (EBM) Produced Nickel-Based Superalloy. *Metallurgical and Materials Transactions, A*, 2020, vol. 51, pp. 6546-6559.

13. Balachandramurthi A.R., Moverare J.J., Dixit N., Deng D., Pederson R. (2019) Microstructural influence on fatigue crack propagation during high cycle fatigue testing of additively manufactured Alloy 718. *Acta Materialia*, 2019, vol. 168, pp. 287-298.

14. Sentyurina Zh.A., Baskiv F.A., Loginov P., Kaplanskii Y., Mishukov A.V., Logachev I.A., Bychkova M.Ya., Levashov E.A., Logacheva A.I. (2021) The effect of hot isostatic pressing and heat treatment on the microstructure and properties of EP741NP nickel alloy manufactured by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 37, p. 101629.

15. Haocheng Zhang, Anqiang Wang, Zhixun Wen, Zhufeng Yue, Chengjiang Zhang (2016) Effects of Hot Isostatic Pressing (HIP) on Microstructure and Mechanical Properties of K403 Nickel-Based Superalloy. *High Temp. Proc.*, 2016, vol. 35, pp. 463-471.

16. Volkov A.V., Evgenov A.G., Ignatov V.A., Chumanov I.R. (2021) [Some technological aspects of the production of blanks by hot isostatic pressing of capsules with granules of heat-resistant nickel alloys]. *Problemy chornoj metallurgii i materialovedeniya*, 2021, vol. 1, pp. 25-30 (in Russ.).

17. Mazalov I.S., Volkov A.M., Lomberg B.S., Chabina E.B. (2022) [Microstructure and mechanical properties of high-strength nickel alloy VJ172 obtained by hot isostatic pressing of granules]. *Trudy VIAM*, 2022, vol. 9, pp. 15-27 (in Russ.).

18. Volkov A.M., Karyagin D.A., Letnikov M.N., Bakradze M.M., Perevozov A.S. (2020) [Features of the production of GTE disk blanks from pellets of high-heat-resistant nickel alloys]. *Metallurg*, 2020, vol. 4, pp. 75-80 (in Russ.).

19. Shestakov A.V., Karashaev M.M., Dmitriev N.S. (2021) [Technological ways of creating composite materials based on heat-resistant refractory compounds (overview)]. *Trudy VIAM*, 2021, vol. 8, pp. 12-20 (in Russ.).

20. Zajcev D.V., Sbitneva S.V., Ber L.B., Zavadov A.V. (2016) [Determination of the chemical composition of the particles of the main phases in products made of granulated nickel heat-resistant alloy EP741NP]. *Trudy VIAM*, 2016, vol. 9, pp. 61-71 (in Russ.).

21. Xu J., Gruber H., Boyd R.D., Jiang S., Peng R.L., Moverare J.J. (2020) On the strengthening and embrittlement mechanisms of an additively manufactured Nickel-base superalloy. *Materialia*, 2020, p. 100657.

Investigation of the Formation of Structure and Properties in a Billet Made of Heat-Resistant Nickel Alloy EP741NP, Obtained by Hot Isostatic Pressing Technology

A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.A. Ryabov, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Solovev, Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

D.I. Vasyankin, Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Shuyanova, Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Demchenko, Ruspolimet JSC, Kulebaki, Russia

It is known that the technology of hot isostatic pressing (HIP) can reduce the residual porosity and increase the level of physical and mechanical characteristics of products obtained by powder metallurgy methods. In modern aircraft and rocket engineering, heat-resistant heterophase nickel alloys are used, which are obtained with the use of granular metallurgy. This material is indispensable in the creation of disks of gas turbine engines (GTE), which are part of the turbine rotor and serve to install the blades. Obtaining a nonporous product made of EP741NP alloy using the HIP technology will increase the service life of the turbine disks, which is an urgent task at the present time. The aim of the work is to study the structure and physical and mechanical properties of a billet made of heat-resistant nickel alloy EP741NP obtained by the HIP method at a temperature of 1150 °C.

The starting material for the preparation of the workpiece is a metal powder EP741NP, obtained by gas atomization and having a fractional composition of 20...50 microns.

It is shown that the HIP process at a temperature of 1150 °C makes it possible to obtain an optimal combination of physical and mechanical properties. Based on the obtained images of powder particles and the microstructure of the work piece, the shape of the particles of the powder under study, the main category of powder granularity was determined and digital porosity analysis of the workpiece under study was performed in the Thixomet Pro software package. The changes in density and hardness along the section of the work piece were also evaluated.

It has been established that at a temperature of HIP 1150 °, the average porosity is insignificant and is 0.1 %, however, as we move away from the edge of the workpiece to its center, there is an increase in the content of pores, the size of which lies in the range of 1...20 microns. It is shown that during the technological process of HIP, an arched effect is observed, the consequence of which are overestimated characteristics of microhardness and density at the edge of the work piece.

Keywords: hot isostatic pressing, heat-resistant nickel alloy, metallographic analysis, hardness, density.

Получено 10.11.2023

Образец цитирования

Исследование формирования структуры и свойств в заготовке из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, полученной по технологии горячего изостатического прессования / А. А. Хлыбов, Д. А. Рябов, А. А. Соловьев, Д. И. Васянкин, А. А. Шуянова, А. А. Демченко // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 4. С. 42–49. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-42-49

For Citation

Khlybov A.A., Ryabov D.A., Solovev A.A., Vasyankin D.I., Shuyanova A.A., Demchenko A.A. (2023) [Investigation of the Formation of Structure and Properties in a Billet Made of Heat-Resistant Nickel Alloy EP741NP, Obtained by Hot Isostatic Pressing Technology]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 42-49 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-42-49