

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.762

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83



ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИП НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ВЖ 159

Хлыбов А.А.¹, Беляев Е.С.¹, Рябцев А.Д.², Беляева С.С.¹,
Гетмановский Ю.А.¹, Явтушенко П.М.², Рябов Д.А.¹

¹Нижегородский государственный технический университет, им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия

²ПАО «Русполимет», Кулебаки, Нижегородская обл., Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В работе исследованы механические свойства формовок из порошка сплава ВЖ159, полученные методом горячего изостатического прессования (ГИП). Формовки имели различную плотность, что реализовано прерыванием цикла ГИП при заданных температурах. Прерывание цикла ГИП выполнялось при температурах 670, 700, 750, 800, 900, 1150°C. Уменьшение доли пор в дисперсном теле приводит к росту прочности по экспоненциальному закону. **Используемые методы.** Порошок ВЖ159 получен методом газовой атомизации. Для исследования применена фракция порошка -70 + 25 мкм, имеющая насыпную плотность 3,77 г/см³, текучесть 2,3 г/с, удельную поверхность 446 см²/г и средний размер частиц по Фишеру 16 мкм. Исходный порошок имеет достаточно высокое значение удельной поверхности, что предопределяет сорбирование его поверхностью газов, с которыми он имеет контакт. Наличие сорбированных газов на поверхности порошка перед ГИП недопустимо, так как в процессе нагрева и одновременного приложения давления сорбированные газы переходят в твердый раствор, располагаясь по границам исходных частиц порошка, что резко снижает механические свойства компактов. Для исключения этого явления перед ГИП порошок в капсуле подвергался вакуумной термической дегазации. **Новизна.** Полученные компакты проходили термическую обработку, состоящую из закалки и старения. Старение выполнялось по двум вариантам: два или четыре цикла старения после закалки. Установлено, что структура беспористых прессовок ГИП имеет более дисперсное зерно (балл 9) по сравнению с литым сплавом (балл 7) аналогичного состава. Термическая обработка с четырьмя циклами старения обеспечивает увеличение значения предела прочности на растяжении при приемлемом уровне относительного удлинения. **Практическая значимость.** Исследование микроструктуры компактов после ГИП и термической обработки показало отсутствие сетки остаточных границ гранул (PPBs-PriorParticleBoundaries), что свидетельствует о корректных режимах вакуумной термической дегазации порошка.

Ключевые слова: технология горячего изостатического прессования, металлические порошки, пористость, никелевые сплавы, механические свойства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства материалов, изделий и оборудования с использованием аддитивных технологий и технологий газостатирования» на базе ПАО «РУСПОЛИМЕТ» по соглашению № 075-11-2019-084 от 18.12.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года № 218).

© Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М., Рябов Д.А., 2021

Для цитирования

Влияние технологии ГИП на структуру и свойства никелевого сплава ВЖ 159 / Хлыбов А.А., Беляев Е.С., Рябцев А.Д., Беляева С.С., Гетмановский Ю.А., Явтушенко П.М., Рябов Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №3. С. 75–83. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF THE HIP TECHNOLOGY ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF NICKEL ALLOY VZH159

Khlybov A.A.¹, Belyaev E.S.¹, Ryabtsev A.D.², Belyaeva S.S.¹,
Getmanovsky Yu.A.¹, Yavtushenko P.M.², Ryabov D.A.¹

¹Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

²PJSC Ruspolymet, Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). This paper studies the mechanical properties of moldings from powder of alloy VZh159 produced by the hot isostatic pressing (HIP) method. The moldings had different densities as a result of interrupting the HIP cycle at specified temperatures. The HIP cycle was interrupted at temperatures of 670, 700, 750, 800, 900, 1150°C. A decrease in a share of pores in a dispersed body leads to an exponential increase in strength. **Methods Used.** VZh159 powder was produced by a gas atomization method. To carry out the study, the authors used a powder fraction of -70+25 microns, having a bulk density of 3.77 g/cm³, a flow rate of 2.3 g/s, a specific surface of 446 cm²/g and an average particle size according to Fischer of 16 microns. The original powder has a sufficiently high specific surface area, which predetermines its absorption by the surface of contacting gases. The presence of sorbed gases on the surface of the powder before HIP is unacceptable because in the process of heating and simultaneous application of pressure, the sorbed gases pass into a solid solution along the boundaries of the initial powder particles, sharply reducing the mechanical properties of compacts. To eliminate this phenomenon, the powder in the capsule was subjected to vacuum thermal degassing before HIP. **Novelty.** The produced compacts underwent heat treatment, consisting of quenching and aging. Aging was carried out in two ways: two or four aging cycles after quenching. It has been established that the structure of the HIP compacts has a more dispersed grain (9 points) in comparison with the cast alloy (7 points) of a similar composition. Heat treatment with four aging cycles provides an increase in ultimate tensile strength at an acceptable level of percentage elongation. **Practical Relevance.** The study on the microstructure of compacts after HIP and heat treatment showed no grid of residual grain boundaries (PPBs - Prior Particle Boundaries), indicating correct vacuum thermal degassing modes for the powder.

Keywords: hot isostatic pressing technology, metal powders, porosity, nickel alloys; mechanical properties.

This research was carried out with the financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the project "Creation of high-tech production of materials, products and equipment using additive and gasostatic technologies" at PJSC RUSPOLYMET under agreement No. 075-11-2019-084 dated December 18, 2019 (Decree of the Government of the Russian Federation dated April 09, 2010, No. 218).

For citation

Khlybov A.A., Belyaev E.S., Ryabtsev A.D., Belyaeva S.S., Getmanovsky Yu.A., Yavtushenko P.M., Ryabov D.A. Influence of the HIP Technology on the Structure and Properties of Nickel Alloy VZH159. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 75–83. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-75-83>

Введение

Горячее изостатическое прессование (ГИП) предназначено для изготовления изделий и заготовок из порошков и гранул, является заключительным процессом компактирования порошка. Одной из основных задач ГИП является устранение пористости и повышение однородной структуры материала. В процессе ГИП осуществляется одновременное воздействие на заготовку высокой температуры и давления с выдержкой при этих параметрах в течение заданного времени, создаваемого в газостате инертным газом, под воздействием которого происходит уплотнение материала заготовки по механизмам пластической деформации, интенсивной кратковременной ползучести и диффузионной сварки. В качестве среды, передающей давление на заго-

товку, обычно используется инертный газ, например аргон [1, 2].

Равенство давления, создаваемого в газостате по всем направлениям приводит к изотропности свойств материала. Приложение высокого давления обеспечивает получение теоретической плотности материала при температурах 0,8–0,9T_{пл}, что недостижимо при спекании без давления. Благодаря этому ГИП, как правило, делает возможным более точное воздействие на микроструктуру материала и позволяет получать детали с высокодисперсной структурой, повышенными механическими свойствами, высокими эксплуатационными характеристиками [3, 4].

Использование специальных капсул (форм, близких к конечной форме изготавливаемой детали) позволяет получать изделия с высоким коэффициентом использования материала с повы-

шенными механическими свойствами: пределом прочности, относительным удлинением, ударной вязкостью. Технологии ГИП эффективны для широкого круга сплавов при изготовлении ответственных высоконагруженных изделий. ГИП является актуальной научно-технической задачей.

В работе рассматривается влияние плотности спекаемого материала на свойства образцов, получаемых в процессе их изготовления.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования выбран жаропрочный никелевый деформируемый сплав марки ВЖ159 системы Ni–Cr–Mo–Nb–Al. Порошок сплава был получен методом распыления аргоном. Химический состав порошка соответствует составу стали ВЖ159 (ХН58МБЮ, ГОСТ 5632-2014), приведен в **табл. 1**. Измерения произведены на рентгенофлуоресцентном анализаторе «X-Strata 980 ф» OxfordInstruments, размер коллиматора – 0,3 мм.

Таблица 1. Химический состав порошка ВЖ159

Table 1. Chemical composition of VZh159 powder

Химический элемент	Содержание, масс. %		
Ti	0,42	±	0,105
Cr	26,34	±	0,395
Mn	0,12	±	0,192
Fe	1,47	±	0,839
Ni	60,63	±	0,349
Cu	0,20	±	0,069
Nb	3,15	±	0,0059
Mo	7,21	±	0,016
W	0,16	±	0,106

Форму частиц порошка изучали с помощью микроскопа KeyenceVHX – 1000.

Частицы порошка каждой фракции имеют преимущественно округлую форму (**рис. 1**). С увеличением размера частиц становится отчетливо видно дендритное строение частиц порошка, а форма частиц имеет незначительные отклонения от округлой. Более крупные частицы имеют на поверхности закрепленные более мелкие частицы. Эта особенность характерна для всех фракций порошка.

Пористость образцов определяли путем гидростатического взвешивания, а также оценивали по результатам анализа изображений микрофотографий с использованием программы ImagePro. Испытания на сжатие проводили на испытательной машине УМЭ-10ТМ, оборудованной нагревательным устройством, обеспечивающим температуру испытаний до 1200°C. По-

грешность измерения составляет 1%. Контроль за температурой испытаний осуществлялся термопарой типа ТХА, установленной внутри нагревательной печи. Далее термопара подключалась к модулю АЦП-ЦАП, который обеспечивает регистрацию параметров на компьютер.

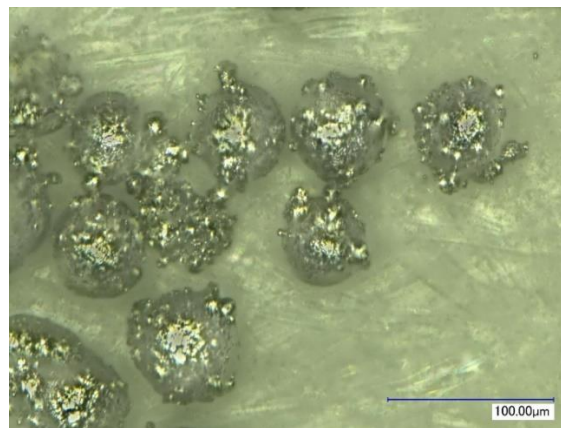


Рис. 1. Внешний вид поверхности частиц порошка ВЖ-159. x1000

Fig. 1. Surface of VZh159 powder particles. x1000

Анализ результатов исследований

Для изготовления образцов порошки засыпали в цилиндрическую капсулу до достижения необходимой плотности засыпки 66–67%.

Далее проводили дегазацию в вакууме при подъеме температуры до 650°C со скоростью 60–100°C/ч. Дегазация необходима для удаления газов, поглощенных поверхностью порошка при их изготовлении и последующих технологических операциях. Необходимость выполнения дегазации объясняется достаточно большой удельной поверхностью порошка и, как следствие, его повышенной химической активностью. В целом влияние газовых примесей на свойства сплавов негативное и, как правило, приводит к снижению механических свойств. Газы в беспористых прессовках, полученных ГИП, образуют простые химические соединения [4, 5–7] – оксиды, карбиды, нитриды, а также более сложные, например оксикарбонитриды. После выполнения цикла дегазации капсула герметизировалась с помощью сварки с последующим контролем герметичности неразрушающими методами. После герметизации капсулы в камеру газостата закачивали аргон, создавали давление 60 МПа и осуществляли нагрев газа.

На **рис. 2** приведена зависимость изменения давления в рабочей камере от температуры. В данном случае эти параметры связаны по закону Шарля уравнением

$$P = 0,132T.$$

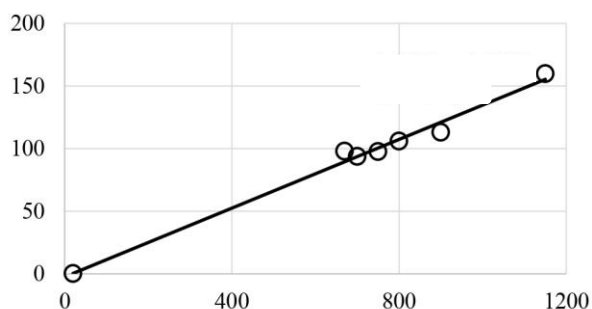


Рис. 2. Изменение давления в газостате в зависимости от температуры

Fig. 2. Pressure change in the gasostat depending on temperature

Для оценки изменения плотности заготовок в процессе ГИП и для определения влияния плотности получаемых заготовок на предел текучести проводили серию экспериментов по прерванному циклу ГИП: при достижении температуры и давления в газостате некоторых промежуточных значений делаем резкое снижение температуры и давления. Это приводит к «замороженной» плотности, то есть плотности, соответствующей достигнутой температуре и давлению на момент их резкого снижения. В результате этих экспериментов могут быть получены данные о плотности и пределе текучести заготовок при определённом давлении и температуре в газостате (результаты приводятся в **табл. 2**).

Таблица 2. Влияние параметров прерванного цикла на характеристики получаемого материала
Table 2. Influence of the parameters of the interrupted cycle on the characteristics of the produced material

Образец	Цикл ГИП		$\sigma_{0.2}$, МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	Плотность, кг/м ³	Относительная плотность
	T, °C	P, МПа	пористый	монокристалл		
ВЖ 159	670	98	21,3	610	5,02	0,61
	700	93,6	42,8	570	5,59	0,68
	750	97,6	75,6	450	5,82	0,71
	800	106	92,5	345	6,1	0,74
	900	113	95	200	7,23	0,88
	1150	160	100	100	8,2	1

Для определения механических свойств (испытание на сжатие) из полученной заготовки методом электроэрозионной резки вырезали образцы со следующими геометрическими размерами: диаметр 15 мм, высота 25 мм.

Как видим из **табл. 2**, с увеличением температуры прерванного цикла плотность образцов

возрастает, также растет предел текучести образцов. Следует отметить, что при температуре 670 и 700°C наблюдается хрупкое разрушение полученных образцов (**рис. 3**). Диаграмма сжатия при температуре испытаний 670°C приведена на **рис. 4**.



а



б

Рис. 3. Образец ВЖ 159 при 670°C:
а – до разрушения; б – после разрушения
Fig. 3. Specimen of VZh159 at 670°C:
a is before destruction; б is after destruction



Рис. 4. Диаграмма сжатия образца ВЖ 159 при 670°C
Fig. 4. Compression diagram of the specimen of VZh159 at 670°C

Используя уравнение Е.А Рышкевича, связывающее относительную плотность и предел текучести, возможно достаточно точно рассчитать относительную плотность при заданной температуре (рис. 5). Испытания показали, что с увеличением относительной плотности зависимость предела текучести возрастает (рис. 6). Также наблюдается переход от хрупкого разрушения к вязкому, пластические свойства получаемых образцов улучшаются.

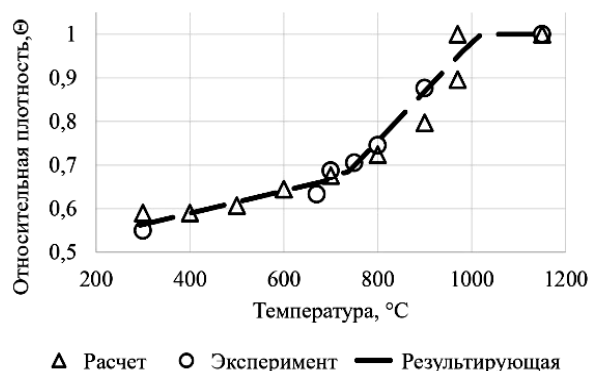


Рис. 5. Зависимость относительной плотности от температуры прерванного цикла

Fig. 5. Dependence of the relative density on the temperature of the interrupted cycle

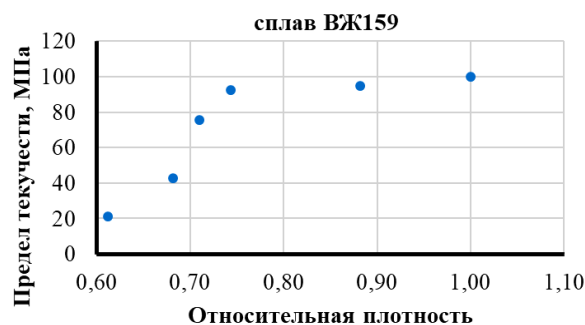
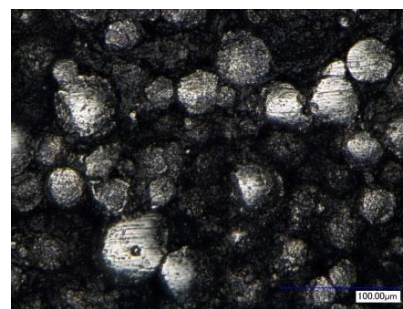


Рис. 6. Зависимость предела текучести от относительной плотности

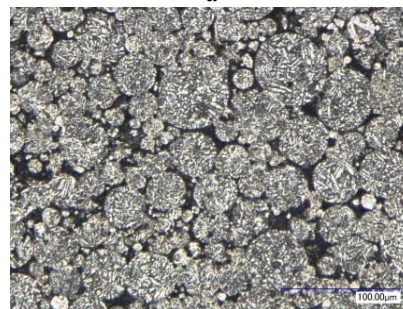
Fig. 6. Dependence of the yield point on the relative density

На рис. 7 приведены фотографии микроструктур, полученных для различных относительных плотностей. При температуре 700°C наблюдаются отдельные «порошинки» (рис. 7, а), которые при внешнем давлении в газостате взаимодействуют упруго. Кроме того, эта фотография также подтверждает высокую пористость образцов, полученных для выбранных режимов газостатирования. С ростом температуры плотность возрастает, наблюдается деформация порошка (рис. 7, б). При температуре 1150°C наблюдаем структуру материала, аналогичную структуре монолитного материала. Плотности материалов, по-

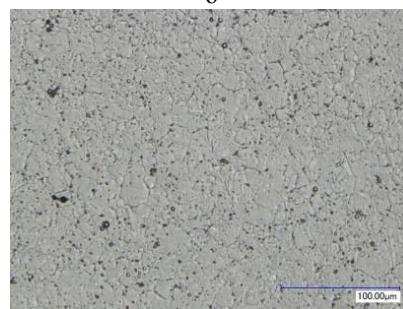
лученных методом ГИП и монолитного материала, совпадают.



а



б



в

Рис. 7. Структуры материалов: а – при 700°C; б – при 900°C; в – при 1150°C

Fig. 7. Material structures: а is at 700°C, б is at 900°C, в is at 1150°C

Известно, что ГИП для стареющих сплавов по структурному состоянию является эквивалентом закалки: в таком состоянии для металла характерна наиболее высокая пластичность и недостаточная прочность. Для достижения оптимального комплекса механических свойств дисперсионно-твердеющие сплавы после ГИП должны подвергаться старению. Для заготовок из сплава ВЖ159 старение проводится в две ступени: высокотемпературное и последующее низкотемпературное с охлаждением на воздухе после каждой ступени.

Полученные после ГИП компакты были подвергнуты термической обработке по двум вариантам:

– двукратное старение (закалка 1100°C, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе; старение 800°C, вы-

держка 10 ч, охлаждение на воздухе; старение 700°C, выдержка 15 ч, охлаждение на воздухе);

– четырехкратное старение (закалка 1100°C, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе; старение 900°C, выдержка 5 ч, охлаждение на воздухе; старение 800°C, выдержка 10 ч, охлаждение на воздухе; старение 700°C, выдержка 10 ч, охлаждение на воздухе; старение 650°C, выдержка 10 ч, охлаждение на воздухе).

Закалка и старение выполнены в лабораторной печи СНОЛ 8,2/1100.

Целью термической обработки сплава ВЖ-159 является получение высокодисперсной микроструктуры, состоящей из твердого раствора с дисперсными включениями карбидов и γ' -фазы. После закалки формируется гомогенный твердый раствор, а в процессе старения выделяются упрочняющие фазы, размер которых во многом зависит от режимов старения.

Для сравнения на **рис. 8** приводятся микроструктуры заготовок, полученных ГИП и выплавленных в индукционной печи. Приведенные микроструктуры свидетельствуют о значительном измельчении зерна в заготовках, полученных ГИП. Независимо от режима старения средний размер зерна в заготовках после ГИП соот-

ветствует 9-му баллу, а в заготовках полученных литьем – 7-му баллу по ГОСТ 5639-82. Размер зерна в заготовке после ГИП на 30% меньше, чем в литой.

После ГИП и термической обработки формируется высокий уровень механических свойств: предел прочности на растяжение до 1226 МПа при относительном удлинении 37%. Полученные механические свойства существенно превосходят требуемые согласно СТО 78721433-048-2014 по пределу прочности на 21–22% и по относительному удлинению на 36–45%. Такие свойства, очевидно, обусловлены размером зерна за счет применения тонких порошков для ГИП.

В **табл. 3** приводятся данные о механических свойствах заготовок, полученных ГИП после дву- и четырехкратного режимов старения.

Следует отметить, что при двукратном старении получаем предел прочности на уровне 1167 МПа и относительное удлинение 41%, а при четырехкратном – 1226 МПа и 29%. Четырехкратное старение гарантирует получение более прочного материала, однако и более хрупкого. Такие различия связаны с размерами выделившихся упрочняющих фаз в результате старения.

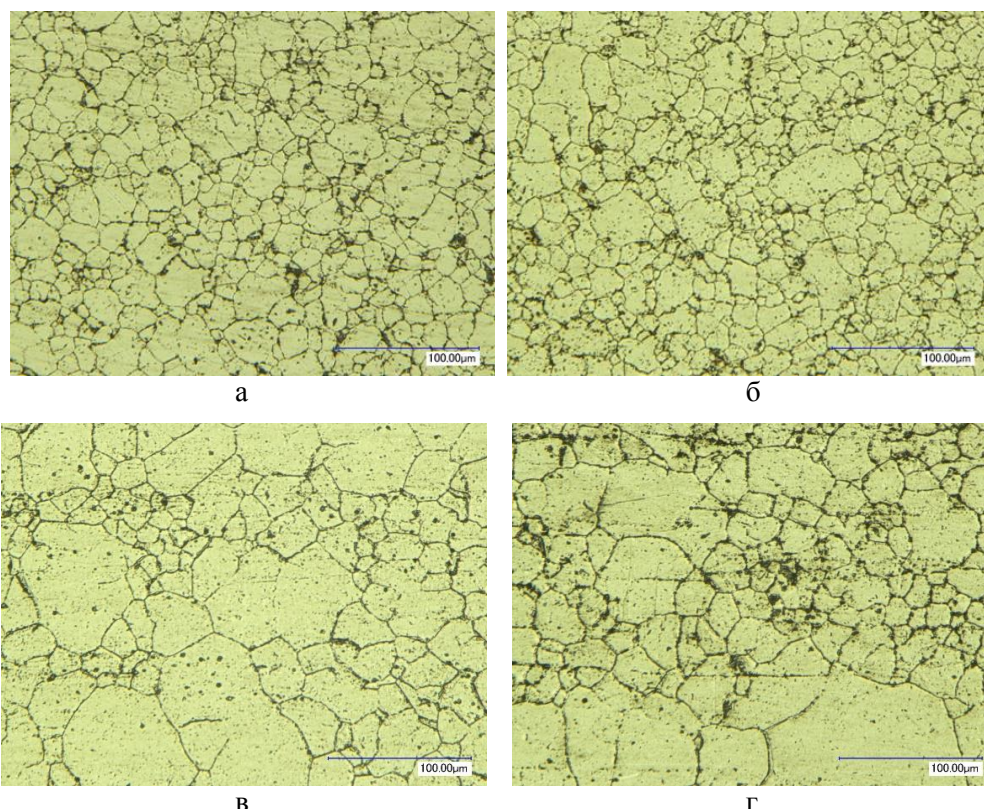


Рис. 8. Микроструктура образцов из сплава ВЖ159: а – ГИП, двукратное старение; б – ГИП, четырехкратное старение; в – литье, двукратное старение; г – литье, четырехкратное старение. Увеличение $\times 1000$

Fig. 8. Microstructure of the VZh159 alloy specimens: а is HIP, double aging; б is HIP, fourfold aging; в is casting, double aging; г is casting, fourfold aging. $\times 1000$ magnification

Таблица 3. Механические свойства заготовок, полученных ГИП, после закалки и двукратного или четырехкратного старения

Table 3. Mechanical properties of workpieces produced by HIP after quenching and double or fourfold aging

Старение	Температура испытания $T_{\text{и}}$, °C	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСЧ, Дж/см ²
2-кратное	25	1167	794	32	41	46
	850	343	329	44	37	-
4-кратное	25	1226	873	29	37	37

Проведенный количественный металлографический анализ пористости материала после проведения ГИП и термической обработки, а также последующей высокотемпературной выдержки показал, что после ГИП и последующей термической обработки объемная доля пор в материале не превышает 0,004%, а последующая длительная выдержка при рабочих температурах влияния на пористость не оказывает – сохраняются практически идентичные низкие значения.

Заключение

1. Рассмотрена технология изготовления сплава ВЖ-159 методом ГИП и ее ключевые этапы:

- проведен анализ необходимости процесса вакуумной дегазации порошка;
- рассмотрен цикл ГИП и обоснован выбор режимов прерванного цикла;
- получены значения относительной плотности заготовки от параметров цикла.

2. Установлено, что компакты, полученные ГИП, имеют более высокодисперсную микроструктуру. Показано, что в образцах, полученных ГИП, структура соответствует 9-му баллу, а для литых образцов 7-му баллу зерна по ГОСТ 5639-82.

4. Механические свойства компактов, полученных ГИП, превосходят требования НТД по пределу прочности на 21–22% и по относительному удлинению на 36–45%.

Список литературы

1. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. 1997. №4. С. 4–11.
2. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок / Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №SP2. С. 98–103.
3. Моисеев С.А., Латышев В.Б. Жаропрочные свариваемые сплавы для узлов статора современных и перспективных авиационных ГТД // Авиационные

материалы и технологии. 2003. №1. С. 152–157.

4. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
5. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения / Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
6. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД / Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.
7. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков / Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
8. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками / Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И. и др. // Известия вузов. Сер. Машиностроение. 2016. №9 (678). С. 62–80.
9. Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления / Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Карачевцев Ф.Н., Мазалов И.С. // Технология машиностроения. 2015. №9. С. 11–16.
10. Ломберг Б.С., Моисеев С.А. Жаропрочные и деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №6. С. 2–5.
11. Жаростойкое покрытие для защиты высокопрочных сложнолегированных никелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии / Солнцев С.Ст., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьева Г.А. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №6. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-4-4.
12. Технологические параметры получения деталей холодной штамповкой из листовых заготовок жаропрочных сплавов ВЖ159, ВЖ171 и высоко-

- прочного сплава ВЖ172 / Ломберг Б.С., Капитаненко Д.В., Мазалов И.С., Бубнов М.В. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. №8. С. 14–19.
13. Мазалов И.С., Евгенов А.Г., Прагер С.М. Перспективы применения жаропрочного структурно-стабильного сплава ВЖ159 для аддитивного производства высокотемпературных деталей ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-3-7.
 14. Евгенов А.Г., Горбовец М.А., Прагер С.М. Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15.
 15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
- ### References
1. Sorokin L.I. Weldability of heat-resistant alloys used in aircraft gas turbine engines. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production], 1997, no. 4, pp. 4–11. (In Russ.)
 2. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. High heat-resistant wrought nickel alloys for promising gas turbine engines and gas turbine plants. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Mashinostroenie* [Herald of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering], 2011, no. SP2, pp. 98–103. (In Russ.)
 3. Moiseev S.A., Latyshev V.B. Heat-resistant weldable alloys for stator assemblies of modern and advanced aircraft gas turbine engines. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2003, no. 1, pp. 152–157. (In Russ.)
 4. Kablov E.N. *Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiya Rossii: sb. nauch.-informats. mater.* [Trends and guidelines for innovative development in Russia: book of scientific and information papers]. 3rd ed. Moscow: VIAM, 2015, 720 p. (In Russ.)
 5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Priorities of development of technologies for the production of heat-resistant materials for aircraft engine building. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya* [Issues of Ferrous Metallurgy and Material Science], 2013, no. 3, pp. 47–54. (In Russ.)
 6. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Casting heat-resistant nickel alloys for promising aircraft gas turbine engines. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2007, no. 2, pp. 6–16. (In Russ.)
 7. Evgenov A.G., Rogalev A.M., Nerush S.V., Mazalov I.S. Study on the properties of EP648 alloy produced by selective laser fusion of metal powders. *Trudy VIAM: electron. nauch.-tekhnich. zhurn.* [Proceedings of VIAM: electronic scientific and technical journal], 2015, no. 2, paper 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (Accessed on October 16, 2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
 8. Kablov E.N., Evgenov A.G., Ospennikova O.G., Semenov B.I. et al. Metal powder compositions of EP648 heat-resistant alloy produced by FSUE VIAM State Scientific Center of the Russian Federation using technologies of selective laser alloying, laser gas-powder surfacing and high-precision casting of polymers filled with metal powders. *Izvestiya vuzov. Ser.: Mashinostroenie* [News of Higher Educational Institutions. Series: Mechanical Engineering], 2016, no. 9 (678), pp. 62–80. (In Russ.)
 9. Evgenov A.G., Rogalev A.M., Karachevtsev F.N., Mazalov I.S. Influence of hot isostatic pressing and heat treatment on the properties of EP648 alloy synthesized by selective laser fusion. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of Machine Building], 2015, no. 9, pp. 11–16. (In Russ.)
 10. Lomberg B.S., Moiseev S.A. Heat-resistant and wrought alloys for modern and promising gas turbine engines. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopedic Reference Book], 2007, no. 6, pp. 2–5. (In Russ.)
 11. Solntsev S.St., Shvagireva V.V., Isaeva N.V., Solovieva G.A. A heat-resistant coating for protection of high-strength complex-alloyed nickel alloys from high-temperature gas corrosion. *Trudy VIAM: electron. nauch.-tekhnich. zhurn.* [Proceedings of VIAM: electronic scientific and technical journal], 2014, no. 6, paper 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (Accessed on October 16, 2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-4-4.
 12. Lomberg B.S., Kapitanenko D.V., Mazalov I.S., Bubnov M.V. Technological parameters of producing parts by cold stamping from sheet blanks of heat-resistant alloys VZh159, VZh171 and high-strength alloy VZh172. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Metal Forming], 2015, no. 8, pp. 14–19. (In Russ.)
 13. Mazalov I.S., Evgenov A.G., Prager S.M. Prospects for the use of heat-resistant structurally stable alloy VZh159 for the additive production of high-temperature gas turbine engine parts. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2016, no. S1 (43), pp. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-3-7.
 14. Evgenov A.G., Gorbovetz M.A., Prager S.M. Structure and mechanical properties of VZh159 and EP648 heat-resistant alloys produced by selective laser fusion. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2016, no. S1 (43), pp. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15.
 15. Kablov E.N. Innovative applications developed by FSUE VIAM State Scientific Center of the Russian Federation to implement "The 2030 strategic priorities for the development of materials and technologies for their processing". *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Хлыбов Александр Анатольевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: hlybov_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

Беляев Евгений Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: yaneck@bk.ru. ORCID 0000-0001-6870-5558

Рябцев Анатолий Данилович – доктор технических наук, профессор, директор центра научно-технического и инновационного развития ПАО «Русполимет», Кулебаки, Нижегородская область, Россия. Email: a.ryabtsev@ruspolymet.ru

Беляева Сулгун Сабуровна – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: sulgun888@mail.ru. ORCID 0000-0001-9042-1404

Гетмановский Юрий Андреевич – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: getmanovskij@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4338-3414

Явтушенко Павел Михайлович – начальник отдела центра научно-технического и инновационного развития ПАО «Русполимет», Кулебаки, Нижегородская область, Россия. Email: p.yavtushenko@ruspolymet.ru

Рябов Дмитрий Александрович – аспирант, ассистент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID: 0000-0002-0486-598X

Alexander A. Khlybov – DrSc (Eng.), Head of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: hlybov_52@mail.ru. ORCID 0000-0002-6559-7819

Evgeny S. Belyaev – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: yaneck@bk.ru. ORCID 0000-0001-6870-5558

Anatoly D. Ryabtsev – DrSc (Eng.), Professor, Director of the Center for Scientific, Technical and Innovative Development of PJSC Ruspolymet Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia. Email: a.ryabtsev@ruspolymet.ru

Sulgun S. Belyaeva – postgraduate student, teaching assistant of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: sulgun888@mail.ru. ORCID 0000-0001-9042-1404

Yuri A. Getmanovsky – postgraduate student, teaching assistant of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: getmanovskij@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4338-3414

Pavel M. Yavtushenko – Head of the Department of the Center for Scientific, Technical and Innovative Development of PJSC Ruspolymet Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia. Email: p.yavtushenko@ruspolymet.ru

Dmitry A. Ryabov – postgraduate student, teaching assistant of the Department of Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X