

Бабенцова Л.П., Анциферова И.В. Изучение характеристик механических свойств образцов из сплава PH1, полученных методом селективного лазерного спекания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 31–39. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.04

Babentsova L.P., Antsiferova I.V. Study of characteristics of mechanical properties of samples from the PH1 alloy obtained by selective laser sintering method // *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 31–39. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.04

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 21, № 2, 2019
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.04
УДК 669.14.018.8:620.17

Л.П. Бабенцова, И.В. Анциферова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА PH1,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ**

Проведены исследования кратковременной прочности и пластичности (E , $\sigma_{0.2}$, σ_b , δ , ψ) образцов из нержавеющей стали PH1, полученных методом селективного лазерного спекания на установке Eosint M280 при различных режимах термообработки. Исследование заключалось в определении оптимального режима термообработки и направления выращивания образцов (горизонтальное или вертикальное). Испытания проводились из сплава PH1 по ГОСТ 1497 с построением условных диаграмм растяжения и определением следящих характеристик: условное временное сопротивление σ_b , условный предел текучести при растяжении $\sigma_{0.2}$, остаточное относительное удлинение δ ; относительное сужение ψ , статический модуль упругости при растяжении E . Определение характеристик механических свойств сплава PH1 при испытании на растяжение на установке LFMZ100 проводилось на цилиндрических образцах, изготовленных из термообработанной заготовки, полученной методом селективного лазерного спекания. Испытания на модуль упругости проводились по ГОСТ 25.502–79. Скорость нагружения при определении прочности составляла 1,25 мм/мин. Скорость нагружения при определении характеристик текучести составляла 0,125 мм/мин. Испытания проводились до разрушения образцов. Анализ результатов показал, что эксплуатационные характеристики образцов достигают максимального значения при получении их горизонтальной ориентацией, в отличие от характеристик, полученных вертикальным направлением выращивания образцов. Исследования структуры и физико-механических свойств сплава PH1 показали, что данный сплав имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с аналогами, полученными с использованием технологий литья, проката и твердофазного спекания. Полученные характеристики кратковременной прочности и пластичности, условные диаграммы растяжения могут быть использованы в прочностных расчетах и при определении режимов испытаний на малоцикловую усталость деталей, изготовленных из сплава PH1.

Ключевые слова: аддитивные технологии, сплав PH1, селективное лазерное спекание, прочность, пластичность, текучесть, растяжение, деформация, относительное удлинение, относительное сужение.

L.P. Babentsova, I.V. Antsiferova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**STUDY OF CHARACTERISTICS OF MECHANICAL PROPERTIES OF SAMPLES
FROM THE PH1 ALLOY OBTAINED BY SELECTIVE LASER SINTERING METHOD**

This paper presents study of short-term strength and ductility of stainless steel samples PH1, obtained by selective laser sintering on the installation Eosint M280 at different heat treatment modes. The study was to determine the optimal mode of heat treatment and the direction of growing samples (horizontal or vertical). Tests were carried out from alloy PH1 according to GOST 1497 with the construction of conditional diagrams of tensile and determination of the following characteristics: conditional time resistance; conditional yield stress; residual elongation; relative contraction; static modulus of elasticity in tension. Characterization of mechanical properties of the alloy PH1 in the tensile test on the installation LFMZ100 were conducted on cylindrical specimens made of heat-treated work pieces obtained by selective laser sintering. Tests on the modulus of elasticity were carried out according to GOST 25.502–79. The rate of loading determining the strength was 1,25 mm/min loading Rate in determining the flow characteristics was 0,125 mm/min the Tests were performed until fracture of the samples. Analysis of the results showed that the performance characteristics of the samples reach a maximum value in obtaining their horizontal orientation than the characteristics obtained by the vertical direction of growing samples. Studies of the structure and physical and mechanical properties of the alloy PH1 showed that this alloy has higher strength characteristics compared to analogues obtained using casting, rolling and solid-phase sintering technologies. The obtained characteristics of short-term strength and plasticity, conventional tensile diagrams can be used in strength calculations and in determining the modes of testing for low-cycle fatigue of parts made of alloy PH1.

Keywords: additive technologies, alloy PH1, selective laser sintering, strength, ductility, fluidity, tensile, deformation, relative elongation, relative reduction.

Введение

Аддитивные технологии (АТ) являются одними из наиболее прогрессивных методов изготовления изделий для авиационной промышленности. Это направление признано приоритетным в области развития материалов и технологий во всем мире [1–5].

Международный комитет F42 ASTM в ASTM F2792-12a (AM) определил технологию аддитивного производства как процесс соединения материалов для создания объектов из 3D-модели. Как правило, процесс происходит выращиванием слой за слоем, в отличие от вычитания механической обработкой в традиционных технологиях¹ [6–9]. Одним из динамично развивающихся направлений аддитивных технологий (АТ) является процесс селективного лазерного сплавления/плавления (СЛС) металлического порошка. Данный метод основан на послойном формировании изделия путем сканирования лазерным лучом порошкового слоя, нанесенного на подложку.

Процесс СЛС отличается глубоким взаимодействием между передачей тепла, массы и химическими процессами, которые приводят к изменению механических и теплофизических свойств материалов [10, 11].

Модели и прототипы, созданные методом СЛС, имеют превосходные механические характеристики: они отличаются прочностью, гибкостью, хорошей детализацией и термической стабильностью. Также результаты работ [12, 13] показали, что образцы из нержавеющей стали марки РН1, получаемые методом селективного лазерного спекания, отличаются самыми высокими механическими и трибологическими свойствами по сравнению с образцами, получаемыми методом горячего прессования и обычным литьем.

Лазерная обработка приводит к выравниванию различных кристаллографических направлений с направлением сборки в среднем и верхнем слоях, а также к постепенному структурному укрупнению [14–16].

Результаты исследования работы [17] также показали, что лазерное спекание одновременно повышает и прочность и пластичность нержавеющей стали РН1. Это достигается путем активации и проектирования ее микроструктуры. Прочность на растяжение СЛС-образцов из нержавеющей стали РН1 может быть увеличена на 16–40 %. В работах [18–24] отмечено, что образцы, изготовленные по

технологии СЛС, обладают комплексом следующих свойств: низкая плотность, высокая прочность и предельная прочность на растяжение.

Таким образом, исследование прочностных и пластических характеристик образцов из сплава РН1, полученных методом селективного лазерного спекания, является актуальной задачей.

Цель – определить характеристики кратковременной прочности и пластичности (E , $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ) при комнатной температуре (20 °С) при различных режимах отжига и отпуска образцов, полученных селективным лазерным спеканием.

Методика испытаний

Проведены испытания образцов из сплава РН1 по исследованию характеристик кратковременной прочности и пластичности (E , $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ).

Испытания проводились из сплава РН1 по ГОСТ 1497 с построением условных диаграмм растяжения и определением следующих характеристик: условное временное сопротивление σ_b , условный предел текучести при растяжении $\sigma_{0,2}$, остаточное относительное удлинение δ , относительное сужение ψ , статический модуль упругости при растяжении E .

В процессе испытаний цилиндрических образцов фиксировались данные по времени, нагрузке и соответствующей ей деформации (частота опроса 0,05 с).

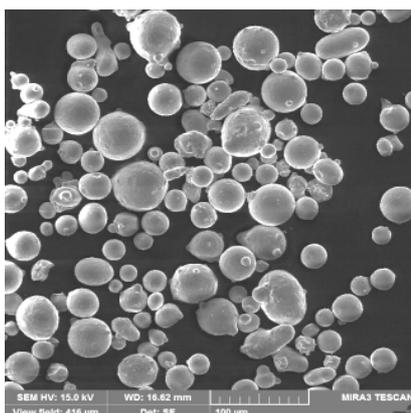
Построение диаграмм растяжения велось в координатах «деформация – напряжение», при этом при построении условной диаграммы использовалось условное напряжение (текущая нагрузка, действующая на образец при данной деформации, отнесенная к начальной площади поперечного сечения).

Определение характеристик механических свойств сплава РН1 при испытании на растяжение на установке LFMZ100 проводилось на цилиндрических образцах, изготовленных из термообработанной заготовки, полученной методом селективного лазерного спекания.

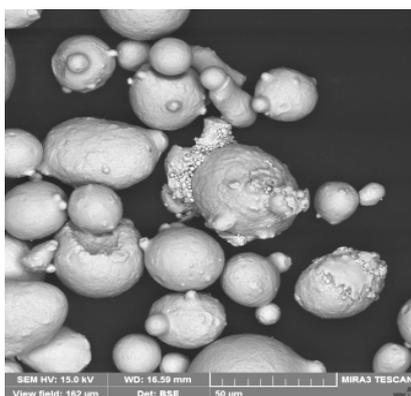
В ходе исследования выявлено, что порошки имеют сферическую форму с наличием сателлитов на поверхности (рис. 1, а). Сателлиты ухудшают текучесть порошка, но браковочным признаком не являются. Также в порошках выявлены частицы неправильной формы (рис. 1, б). В материале частиц порошка РН1 микропор не выявлено.

Заготовки были получены методом селективного лазерного спекания на установке EOSINT M280 из сплава РН1. Параметры, при которых были выращены заготовки для испытаний, представлены в табл. 1.

¹ ASTM F2792-12a. Standard terminology for additive manufacturing technology / ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, 2012.



а



б

Рис. 1. Порошок PH1: а – вид порошка PH1; б – порошок PH1 с наличием сателлитов и частицами неправильной формы

Детали получились полностью сплавленными при стандартных параметрах и толщине слоя построения 20 мкм.

Заготовки прошли термообработку по следующим режимам:

– режим 1: отжиг при температуре 1050 °С в течение 1,5 ч, затем отпуск при температуре 480 °С в течение 1 ч;

– режим 2: отжиг при температуре 1050 °С в течение 1,5 ч, затем отпуск при температуре 525 °С в течение 4 ч;

– режим 3: отпуск при температуре 480 °С в течение 1 ч;

– режим 4: отпуск при температуре 525 °С в течение 4 ч.

Твердость образцов после термообработки составила больше 40 HRC.

Испытания цилиндрических образцов из сплава PH1 на кратковременную прочность были

проведены при температуре 20 °С в соответствии с ГОСТ 1497. Испытания на модуль упругости – по ГОСТ 25.502–79. Скорость нагружения при определении прочности составляла 1,25 мм/мин. Скорость нагружения при определении характеристик текучести составляла 0,125 мм/мин. Испытания проводились до разрушения образцов. Схема испытания приведена на рис. 2.

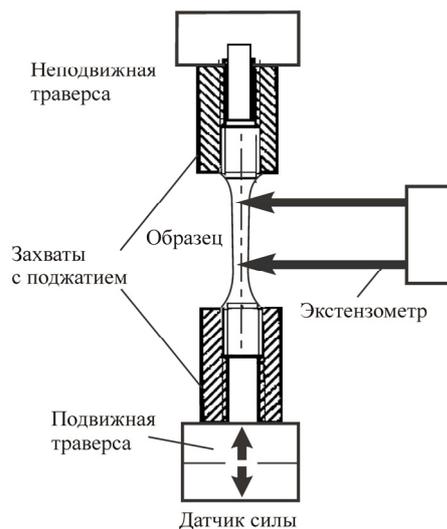


Рис. 2. Принципиальная схема испытания на растяжение на установке LFMZ-100

Результаты исследования

По данным, зафиксированным в ходе испытаний, с помощью заложенного алгоритма в программном обеспечении установки LFMZ100 в соответствии с ASTM 8M автоматически вычислены механические характеристики (E , $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ). Определение модуля упругости в пределах линейного участка диаграммы растяжения с фиксированными границами проведено методом регрессии.

Статистическая обработка [25] результатов испытаний сплава PH1 при температуре 20 °С заключалась в определении средних значений характеристик механических свойств, среднеквадратических отклонений (с.к.о.), значений нижних границ средних характеристик механических свойств с доверительной вероятностью 95 % по формулам

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_i; \quad (1)$$

Таблица 1

Основные параметры для выращивания деталей из сплава PH1

Модель	Рабочая зона, мм	Шаг построения, мкм	Мощность, Вт	Производительность, см³/ч	Материал
EOSINT M280	250×250×350	20–200	400–1000	20–35	PH1

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}, \quad (2)$$

где \bar{X} – среднее значение характеристики механических свойств сплава; X_i – значение характеристики механических свойств отдельных образцов; N – количество элементов выборки; S – с.к.о.

Значения минимальных характеристик механических свойств сплава с вероятностью 99 % определялись по формуле

$$X_{\min} = \bar{X} - 3S. \quad (3)$$

Полученные по формулам (1)–(3) средние значения, с.к.о. и минимальные значения характеристик механических свойств (E , $\sigma_{0,2}$, σ_b , δ , ψ) сплава РН1 при температуре 20 °С представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты статистической обработки характеристик механических свойств сплава РН1 при температуре 20 °С

Режим	Параметр	Тип значений	Значение
Режим 1: отжиг при температуре 1050 °С в течение 1,5 ч, затем отпуск при температуре 480 °С в течение 1 ч. Вертикальное направление выращивания образцов	E , ГПа	среднее	208,92
	$\sigma_{0,2}$, МПа	среднее	1244,21
		минимальное	1224,90
		с.к.о.	6,44
	σ_b , МПа	среднее	1391,604
		минимальное	1369,19
		с.к.о.	7,41
δ , %	среднее	8,88	
ψ , %	среднее	25,17	
Режим 3: отпуск при температуре 480 °С в течение 1 ч. Вертикальное направление выращивания образцов	E , ГПа	среднее	181,67
	$\sigma_{0,2}$, МПа	среднее	1204,046
		минимальное	1093,65
		с.к.о.	36,80
	σ_b , МПа	среднее	1496,29
		минимальное	1484,84
		с.к.о.	3,82
δ , %	среднее	16,504	
ψ , %	среднее	46,914	
Режим 3: отпуск при температуре 480 °С в течение 1 ч. Горизонтальное направление выращивания образцов	E , ГПа	среднее	200,67
	$\sigma_{0,2}$, МПа	среднее	1389,29
		минимальное	1347,76
		с.к.о.	13,84
	σ_b , МПа	среднее	1524,422
		минимальное	1513,62
		с.к.о.	3,602
δ , %	среднее	17,704	
ψ , %	среднее	49,786	

Окончание табл. 2

Режим	Параметр	Тип значений	Значение
Режим 2: отжиг при температуре 1050 °С в течение 1,5 ч, затем отпуск при температуре 525 °С в течение 4 ч. Вертикальное направление выращивания образцов	E , ГПа	среднее	204,652
	$\sigma_{0,2}$, МПа	среднее	1136,1
		минимальное	1120,84
		с.к.о.	5,09
	σ_B , МПа	среднее	1196,812
		минимальное	1185,36
		с.к.о.	3,818
δ , %	среднее	11,464	
ψ , %	среднее	52,88	
Режим 4: отпуск при температуре 525 °С в течение 4 ч. Вертикальное направление выращивания образцов	E , ГПа	среднее	186,572
	$\sigma_{0,2}$, МПа	среднее	1233,6
		минимальное	1159,93
		с.к.о.	24,55
	σ_B , МПа	среднее	1421,9
		минимальное	1394,35
		с.к.о.	9,18
δ , %	среднее	17,128	
ψ , %	среднее	54,406	
Режим 4: отпуск при температуре 525 °С в течение 4 ч. Горизонтальное направление выращивания образцов	E , ГПа	среднее	198,864
	$\sigma_{0,2}$, МПа	среднее	1388,3
		минимальное	1369,9
		с.к.о.	6,14
	σ_B , МПа	среднее	1475,9
		минимальное	1466,72
		с.к.о.	3,06
δ , %	среднее	15,856	
ψ , %	среднее	58,118	

На рис. 3–6 представлены условные диаграммы растяжения сплава РН1 по средним значениям напряжения при температуре испытания 20 °С.

Средние значения напряжения сплава РН1 для заданных значений деформаций $\epsilon = 0,003; 0,004; 0,005; 0,006; 0,007; 0,008; 0,009; 0,010; 0,011; 0,012; 0,013; 0,014; 0,015; 0,020; 0,030; 0,040$, необходимые для построения условной диаграммы растяжения, определялись по формуле (1).

Из табл. 2 и рис. 3–6 видно следующее:

- средние значения модуля упругости E , условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности при растяжении σ_B достигают максимального значения при получении их в горизонтальном направлении выращивания образцов;
- величина относительного удлинения δ достигает максимального значения 17,704 % при режиме 3 с горизонтальной ориентацией и минималь-

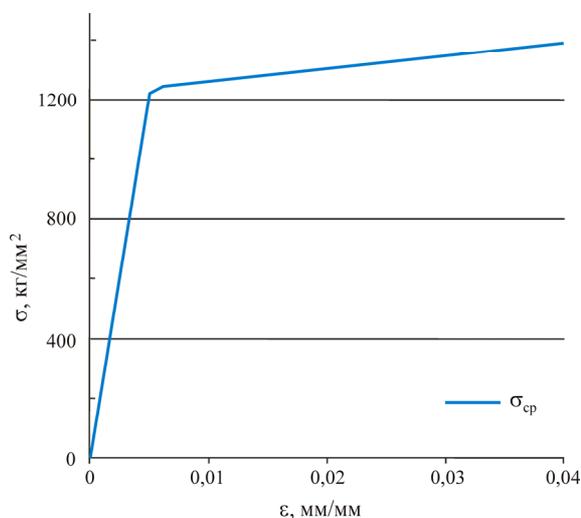


Рис. 3. Кривая деформирования сплава РН1 при температуре 20 °С с режимом термообработки 1

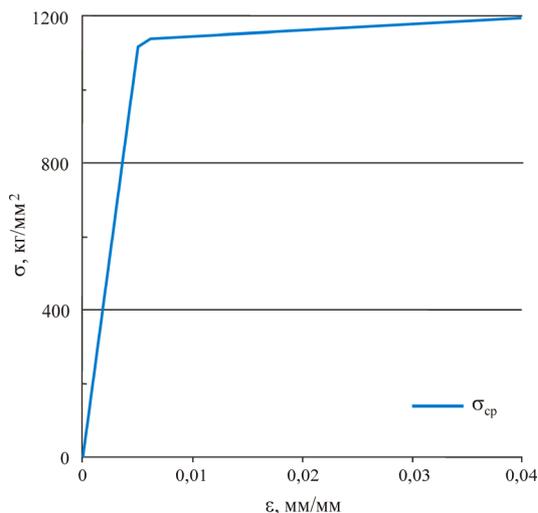


Рис. 4. Кривая деформирования сплава PH1 при температуре 20 °С с режимом термообработки 2

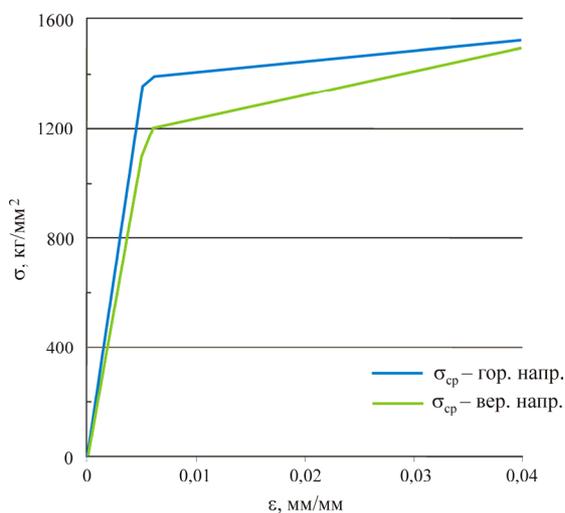


Рис. 5. Кривая деформирования сплава PH1 при температуре 20 °С с режимом термообработки 3

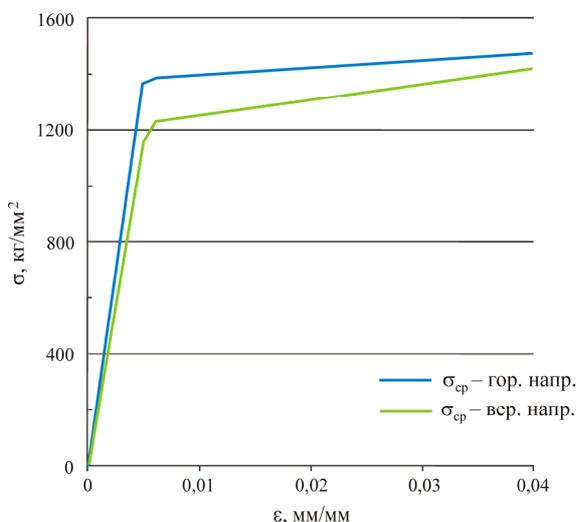


Рис. 6. Кривая деформирования сплава PH1 при температуре 20 °С с режимом термообработки 4

ного значения 8,88 % при режиме 1 с вертикальной ориентацией выращивания образцов;

– относительное сужение ψ достигает максимального значения 58,118 % при режиме 4 с горизонтальной ориентацией и минимального значения 25,17 % при режиме 1 с вертикальной ориентацией выращивания образцов.

Важным результатом исследования является эффект упрочнения.

Предел прочности σ_b сплава PH1 достигает 1524,422 МПа при режиме 3 с горизонтальной ориентацией выращивания образцов, что на 10–30 % выше, чем у других материалов. Важно отметить, что СЛС-материал практически полностью лишен «традиционных» недостатков порошковых материалов – сплав имеет рекордно высокую для порошковых аналогов прочность. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ составляет 1388,3 МПа при режиме 4 с горизонтальной ориентацией выращивания образцов.

Необходимо отметить, что образцы, изготовленные по технологии СЛС, имеют более высокие значения предельной прочности на растяжение, что, вероятно, связано с наличием регулярной внутренней структуры образцов.

Выводы

1. Проведены исследования структуры и физико-механических свойств образцов из сплава PH1, полученного с использованием технологии послойного лазерного спекания. Структура имеет сферическую форму частиц, что обеспечивает «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением. Это как раз достигается при сферической форме частиц. Такие частицы более компактно укладываются в определенный объем.

2. По результатам испытаний установлено, что предел прочности σ_b сплава достигает 1524,422 МПа при режиме 3 с горизонтальной ориентацией выращивания образцов, что на 10–30 % выше, чем у других материалов. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ составляет 1388,3 МПа при режиме 4 с горизонтальной ориентацией выращивания образцов.

Пластичность сплава существенно выше, чем у порошковых аналогов, – удлинение до разрушения δ при комнатной температуре достигает 17,704 %.

Необходимо отметить, что образцы, изготовленные по технологии СЛС, имеют более высокие значения предельной прочности на растяжение, что, вероятно, связано с наличием регулярной внутренней структуры образцов.

3. Эксплуатационные характеристики образцов достигают максимального значения при полу-

чении их горизонтальной ориентацией, в отличие от характеристик, полученных вертикальным направлением выращивания образцов.

4. Исследования структуры и физико-механических свойств сплава РН1 показали, что данный сплав имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с аналогами, полученными с использованием технологий литья, проката и твердофазного спекания.

5. Полученные характеристики кратковременной прочности и пластичности, условные диаграммы растяжения могут быть использованы в прочностных расчетах и при определении режимов испытаний на малоцикловую усталость деталей, изготовленных из сплава РН1.

Список литературы

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ. – М.: МИСИС-ВИАМ, 2002. – С. 23–47.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. – М.: МИСИС-ВИАМ, 2015. – 557 с.
3. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2014. – Вып. № 78. – URL: <https://mai.ru/upload/iblock/e6e/e6ed6634d88fd08e030a8736e3f845e4.pdf> (дата обращения: 03.10.2018).
4. Михайлова А.Е., Дошина А.Д. 3D принтер – технология будущего // Молодой ученый. – 2015. – С. 40–44.
5. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. – 2014. – № 3. – С. 8–13.
6. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михэилеску. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
7. Бабенцова Л.П., Анциферова И.В. Качество и экология технологии селективного лазерного спекания // Master's Journals. – 2017. – № 1. – С. 87–92.
8. Effect porosity and tension–compression asymmetry on the Bauschinger effect in porous sintered steels / X. Deng, G. Piotrowski, J. Williams, N. Chawla // Inter. J. Fatigue. – 2005. – № 27(10–12). – P. 1233–1243.
9. Yadollah A., Shamsa N. Additive manufacturing of fatigue resistant materials // Challenges and Opportunities. – 2017. – Vol. 98. – P. 14–31.
10. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective laser melting // Laser Technik J. – 2012. – No. 9(2). – P. 33–38.
11. Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base superalloy / T. Vilaro, C. Colin, J.D. Bartout [et al.] // Materials Sci. and Eng. Struct. Materials Properties Microstructure and Proc. – 2012. – Vol. 534. – P. 446–451.
12. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies. – Springer, New York, NY, 2015. – 498 p.
13. Antsiferova I.V., Babentsova L.P., Komarov S.V. Research of the quality of obtaining stocking from stainless

steel by selective laser sintering // Research J. of Pharmaceutical, Biolog. and Chem. Sci. – 2018. – No. 9(3). – P. 162–171.

14. Sears J.W. Direct laser powder deposition-state of the art, powder materials: current research and industrial practices // Marquis FDS, Editor. Proc. of the 1999 Fall TMS Meeting. – 1999. – P. 213–226.

15. Mechanical properties of samples fabricated by selective laser melting / F. Bartolomeu, M. Buciumeanu, E. Pinto, N. Alves, O. Carvalho, F.S. Silva, G. Miranda // Add. Manuf. – 2017. – No. 16. – P. 81–89.

16. Копиев Г. 3D-печать увеличила прочность и пластичность стали [Электронный ресурс] // N+1. – 2017. – URL: <https://nplus1.ru/news/2017/10/31/stainless-steel>. (дата обращения: 13.10.2018).

17. Predictive models for physical and mechanical properties of Ti–6Al–4V produced by Selective Laser Melting / F. Bartolomeu, M. Buciumeanu, E. Pinto, N. Alves, O. Carvalho, F.S. Silva, G. Miranda // Materials Sci. and Eng. – 2016. – No. 03(113). – P. 181–192.

18. Texture evolution in stainless steel processed by selective laser melting and annealing / O. Fergani, V. Brotan, M. Vambach, M.T. Perez Prado // Materials Sci. and Techn. – 2018. – No. 34(18). – P. 1–8.

19. Структура и механические свойства образцов из нержавеющей стали, полученных методом селективного спекания / Л.А. Галимова, В.В. Атрощенко, В.В. Смирнов, А.А. Чуракова, Д.В. Гундеров, Г.И. Заманова // Математика и механика. – 2016. – С. 258–252.

20. Назаров А.П. Перспективы быстрого прототипирования методом селективного лазерного спекания/плавления // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – Т. 1(16), № 4. – С. 46–51.

21. Аддитивное производство с помощью лазера / И.Ю. Смуров, И.А. Мовчан, И.А. Ядроцев, А.А. Окунькова, Е.В. Цветков, Н.Ю. Черкасова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2011. – Т. 2, № 4. – С. 144–146.

22. Simultaneously enhanced strength and ductility for 3D-printed stainless steel 316L by selective laser melting / Zhongji Sun, Xipeng Tan, Shu Beng Tor, Chee Kai Chua // Springer Nature in NPG Asia Materials NPG Asia Materials. – 2018. – Vol. 10. – P. 127–136. DOI: 10.1038/s41427-018-0018-5

23. Malygin G. Plasticity and strength of micro- and nanocrystalline materials // Phys. Solid State. – 2007. – No. 49(6). – P. 1013–1033.

24. Kahlen F.J., Kar A. Tensile strengths for laser-fabricated parts and similarity parameters for rapid manufacturing // J. Manuf. Sci. Eng. – 2001. – No. 123(1). – P. 38–44.

25. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

References

1. Kablov E.H. Aviatsonnoe materialovedenie v XXI veke. Perspektivy i zadachi [Aviation materials science in the XXI century. Prospects and challenges]. *Aviatsonnoye materialy. Izbrannye trudy VIAM*. Moscow: MISIS-VIAM, 2002, pp. 23–47.

2. Kablov E.H. Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiia Rossii [Trends and Guidelines for Innovative Development of Russia]. Moscow: MISIS-VIAM, 2015, 557 p.
3. Chumakov D.M. Perspektivy ispol'zovaniia additivnykh tekhnologii pri sozdanii aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhniki [Prospects for use additive technologies in the development of aviation and space rocket technology]. Trudy MAI, 2014, vyp. № 78. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/e6e/e6ed6634d88fd08e030a8736e3f845e4.pdf> (accessed 03 October 2018).
4. Mikhailova A.E., Doshina A.D. 3D printer – tekhnologiya budushchego [3D printer - the technology of the future]. *Molodoi uchenyi*, 2015, pp. 40–44.
5. Kablov E.N. Rossii nuzhny materialy novogo pokoleniia [Russia needs new generation materials]. *Redkie zemli*, 2014, no. 3, pp. 8–13.
6. Prokhorov A.M., Konov V.I., Ursu I., Mikheilesku I.N. Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniia s metallami [Interaction of laser radiation with metal]. Moscow: Nauka, 1984, 312 p.
7. Babentsova L.P., Antsiferova I.V. Kachestvo i ekologiya tekhnologii selektivnogo lazernogo spekaniiia [Quality and ecology of selective laser sintering technology]. *Master's Journals*, 2017, no. 1, pp. 87–92.
8. Deng X., Piotrowski G., Williams J., Chawla N. Effect porosity and tension–compression asymmetry on the Bauschinger effect in porous sintered steels. *International Journal Fatigue*, 2005, no. 27(10–12), pp. 1233–1243.
9. Yadollah A., Shamsa N. Additive manufacturing of fatigue resistant materials. *Challenges and Opportunities*, 2017, vol. 98, pp. 14–31.
10. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective laser melting. *Laser Technik Journal*, 2012, no. 9(2), pp. 33–38.
11. Vilaro T., Colin C., Bartout J.D. et al. Microstructural and mechanical approaches of the selective laser melting process applied to a nickel-base super-alloy. *Materials Science and Eng. Struct. Materials Properties Microstructure and Proc.*, 2012, vol. 534, pp. 446–451.
12. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive manufacturing technologies. Springer, New York, NY, 2015, 498 p.
13. Antsiferova I.V., Babentsova L.P., Komarov S.V. Research of the quality of obtaining stocking from stainless steel by selective laser sintering. *Research Journal of Pharma-ceutical, Biolog. and Chem. Science*, 2018, no. 9(3), pp. 162–171.
14. Sears J.W. Direct laser powder deposition-state of the art, powder materials: current research and industrial practices. *Marquis FDS, Editor. Proc. of the 1999 Fall TMS Meeting.*, 1999, pp. 213–226.
15. Bartolomeu F., Buciumeanu M., Pinto E., Alves N., Carvalho O., Silva F.S., Miranda G. Mechanical properties of samples fabricated by selective laser melting. *Additive manufacturing*, 2017, no. 16, pp. 81–89.
16. Kopiev G. 3D-pechat' uvelichila prochnost' i plastichnost' stali [3D printing has increased the strength and ductility of steel]. *N+1*, 2017. URL: <https://nplus1.ru/news/2017/10/31/stainless-steel>. (accessed 13 October 2018).
17. Bartolomeu F., Buciumeanu M., Pinto E., Alves N., Carvalho O., Silva F.S., Miranda G. Predictive models for physical and mechanical properties of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting. *Materials Science and Engineering*, 2016, pp. 181–192.
18. Fergani O., Brotan V., Bambach M., Perez Prado M.T. Texture evolution in stainless steel processed by selective laser melting and annealing. *Materials Science and Technology*, 2018, no. 34(18), pp. 1–8.
19. Galimova L.A., Atroshchenko V.V., Smirnov V.V., Churakova A.A., Gunderov D.V., Zamanova G.I. Struktura i mekhanicheskie svoistva obraztsov iz nerzhaveiushchei stali, poluchennykh metodom selektivnogo spekaniiia [Structure and mechanical properties of stainless steel samples obtained by selective sintering]. *Matematika i mekhanika*, 2016, pp. 258–252.
20. Nazarov A.P. Perspektivy bystrogo prototipirovaniia metodom selektivnogo lazernogo spekaniiia/plavleniia [Prospects for rapid prototyping by selective laser sintering/smelted]. *Vestnik MGTU «Stankin»*, 2011, vol. 1(16), no. 4, pp. 46–51.
21. Smurov I.Iu., Movchan I.A., Iadroitsev I.A., Okun'kova A.A., Tsvetkov E.V., Cherkasova N.Iu. Additivnoe proizvodstvo s pomoshch'iu lazera [Additive production with laser]. *Vestnik MGTU «Stankin»*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 144–146.
22. Zhongji Sun, Xipeng Tan, Shu Beng Tor, Chee Kai Chua. Simultaneously enhanced strength and ductility for 3D-printed stainless steel 316L by selective laser melting. *Springer Nature in NPG Asia Materials NPG Asia Materials*, 2018, vol. 10, pp. 127–136. DOI: 10.1038/s41427-018-0018-5
23. Malygin G. Plasticity and strength of micro- and nanocrystalline materials. *Phys. Solid State*, 2007, no. 49(6), pp. 1013–1033.
24. Kahlen F.J., Kar A. Tensile strengths for laser-fabricated parts and similarity parameters for rapid manufacturing. *Journal Manuf. Science Engineering*, 2001, no. 123(1), pp. 38–44.
25. Stepnov M.N. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniia: spravochnik [Statistical methods of mechanical test results processing: reference book]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 232 p.

Получено 24.04.19

Опубликовано 20.06.19

Сведения об авторах

Анциферова Ирина Владимировна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры менеджмента и маркетинга, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: iranciferova@yandex.ru.

Бабенцова Людмила Павловна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lydmila.babencova@yandex.ru.

About the authors

Irina V. Antsiferova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Management and Marketing, Department of Mechanics of Composite Materials and Construction, Perm National

Research Polytechnic University; e-mail: iranciferova@yandex.ru.

Lyudmila P. Babentsova (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Mechanics of Composite Materials and Construction, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lydmila.babencova@yandex.ru.