

УДК 621.762

## СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ 12X18H10T И ALSi10MG, ПОЛУЧЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ

© 2024 Д. А. Бошканец\*, С. Н. Сергеевко\*\*

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)**имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия*

\*E-mail: boshkanetsda@gmail.com

\*\*E-mail: sergeenko@gmail.com

Поступила в редакцию 12.06.2024

После доработки 19.07.2024

Принята к публикации 02.08.2024

В статье рассмотрена комбинированная технология, сочетающая селективное лазерное сплавление (SLM) и продольную прокатку порошковых материалов 12X18H10T и AlSi10Mg. Цель работы – экспериментально установить закономерности влияния обработки давлением на механические характеристики полученных SLM материалов, а именно на твердость и изгибную прочность. Подготовлен литературный обзор, основываясь на информации из которого изготовлена партия тестовых образцов из порошков нержавеющей стали 12X18H10T и алюминиевого сплава AlSi10Mg. Произведена обработка давлением полученных образцов по технологии продольной прокатки. Оценка высотной деформации образцов из сплава 12X18H10T проводилась с помощью истинной (логарифмической) высотной деформации. Морфология исходных материалов исследовалась при помощи электронного микроскопа. Механические свойства материалов оценивались по твердости HRB и изгибной прочности. Дополнительно были проанализированы результаты испытаний на радиальное сжатие кольцевых образцов, изготовленных при аналогичных технологических параметрах. По итогам анализа установлена зависимость между напряжением и деформацией, где для AlSi10Mg наблюдается плавное изменение формы под приложением нагрузки, а для 12X18H10T – наличие критического напряжения, при достижении которого наблюдается увеличение динамики деформации. Растровая электронная микроскопия изломов материала AlSi10Mg показала более однородную структуру прокатанного образца по сравнению с образцом в исходном состоянии. Это является свидетельством положительного влияния обработки давлением (в определенных пределах) на плотность материала AlSi10Mg, полученного методом SLM. По итогам исследования сформулирована и подтверждена результатами экспериментов гипотеза о взаимозависимости высотной деформации и твердости холоднодеформированного материала 12X18H10T, полученного SLM. Установлен предел изгибной прочности порошкового материала AlSi10Mg и зафиксированы максимальные изгибные нагрузки для сплава 12X18H10T. Показаны зависимости между напряжением и деформацией материалов при радиальном сжатии и изгибе. Установлено, что продольная прокатка порошкового материала 12X18H10T способствует снижению сопротивления изгибной силе, но при этом повышаются твердость и упругие свойства.

*Ключевые слова:* порошковая металлургия, селективное лазерное сплавление, обработка давлением, прокатка

DOI: 10.31857/S0235010624050011

## ВВЕДЕНИЕ

Селективное лазерное сплавление (SLM) – одна из наиболее широко распространенных технологий порошковой металлургии (ПМ), в основе которой лежит сплавление мелкодисперсных частичек металлов под воздействием лазера [1]. SLM нашло применение в различных отраслях машино- и авиастроения, в химико-фармацевтическом производстве, горном и нефтяном деле, оборонной промышленности. Основной проблемой SLM является устранение пористости, в той или иной степени характерной для всех технологий порошковой металлургии. Решается данная задача путем оптимизации технологических параметров процесса, а также комбинирования SLM с другими видами обработки, например, с термической (ТО) или обработкой давлением (ОД).

Так, в работах [2, 3] исследовано влияние направления выращивания изделий на механические свойства, а также влияние плотности энергии на твердость порошкового алюминиевого сплава, полученного способом SLM. Механические показатели образцов, выращенных перпендикулярно платформе построения, получились на ~15% выше, относительно образцов, выращенных в параллельном направлении. Уменьшению твердости способствуют повышенные (более 60 Дж/мм<sup>3</sup>) и пониженные (ниже 30 Дж/мм<sup>3</sup>) значения плотности энергии, которая напрямую зависит от скорости сканирования и мощности лазерного излучения. Для получения высококачественных деталей из нержавеющей стали в работах [4, 5] предложен метод SLM, в котором исходными материалами выступают порошки со сферической формой частиц, которая обеспечивает лучшую «текучесть» композиции. Предварительное уплотнение каждого наносимого порошкового слоя перед сплавлением способствует повышению плотности материала. В работе [6] представлен способ SLM для формирования никелевого покрытия на титановой подложке, при котором первый слой порошкового материала наносится под углом 135° относительно изделия, последующие слои – под углом 90° относительно друг друга. В итоге на исследуемой детали образовано покрытие с микротвердостью  $881.8 \pm 15$  HV. Чтобы снизить уровень остаточных напряжений, проводят термическую обработку [7]. ТО осуществляется поэтапно для более равномерного снятия остаточных напряжений. Выдержка проходит в течение 120 минут при температурах 453 К, 673 К, 873 К, 1073 К, охлаждение – совместно с печью. За счет сочетания различных технологий получают изделия с низкими пористостью и уровнем остаточных напряжений, а также высокими механическими свойствами. Для изготовления износостойких деталей из порошковых вольфрам–карбидных композиций известны методы SLM, представленные в работах [8, 9]. В них исследовано влияние толщины наносимого слоя и направления сканирования на качество материала. При уменьшении толщины наносимого слоя изделия имеют более низкую шероховатость и точную геометрию. При разнонаправленной стратегии сканирования пористость образцов получается в 6.5 раз более низкая по сравнению с образцами, изготовленными при однонаправленной стратегии. В работах [10,11] представлены комбинированные методы SLM стальных и никелевых сплавов, включающие обработку давлением и последующую ТО. Установлено, что горячее изостатическое прессование (ГИП) приводит к повышению прочности и пластичности образцов за счет закрытия пор. Термическая обработка способствует еще большему увеличению прочности материала, но при этом несколько снижает пластические свойства.

Цель работы – экспериментально установить закономерности влияния обработки давлением на механические характеристики полученных SLM материалов, а именно на твердость и изгибную прочность.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе установленных закономерностей влияния технологических параметров SLM на характеристики получаемого материала была изготовлена партия тестовых образцов. Выбор исследований пал на стальные и алюминиевые сплавы, поскольку они являются наиболее распространенным конструкционным сырьем для производства комплектующих в автомобильной, авиационной, судостроительной, оборонной и других отраслях промышленности. Актуальностью технологии SLM здесь является значительное снижение отходов и издержек при изготовлении сложнопрофильных деталей. В качестве исходных материалов для производства образцов использовался порошок нержавеющей стали ПР-12Х18Н10Т, фракционный состав 10...63 мкм, производитель АО «Полема», а также порошок алюминиевого сплава AlSi10Mg, фракционный состав 10...45 мкм, производитель АО «Русал». Химический состав сплава 12Х18Н10Т, мас. %: Fe (основа), Cr – 17.35%, Ni – 10.68%, Mn – 0.74%, Si – 0.68%, Ti – 0.66%, C – 0.099, S – 0.02%, P – 0.03%; сплава AlSi10Mg, масс. %: Al (основа), Si – 9.7%, Mg – 0.33%, Fe – 0.14%. Для исследования морфологии порошков исходных материалов, а также структуры поверхности образцов и изломов, применялась растровая электронная микроскопия (РЭМ) [12]. На Рис. 1 представлены микрофотографии исходных порошков, полученных методом газовой атомизации, на которых отчетливо видна сферическая форма частиц. SLM испытательных образцов осуществлялось на установке «SLM 280» немецкой компании «SLM Solutions». Используемые технологические параметры для 12Х18Н10Т: толщина

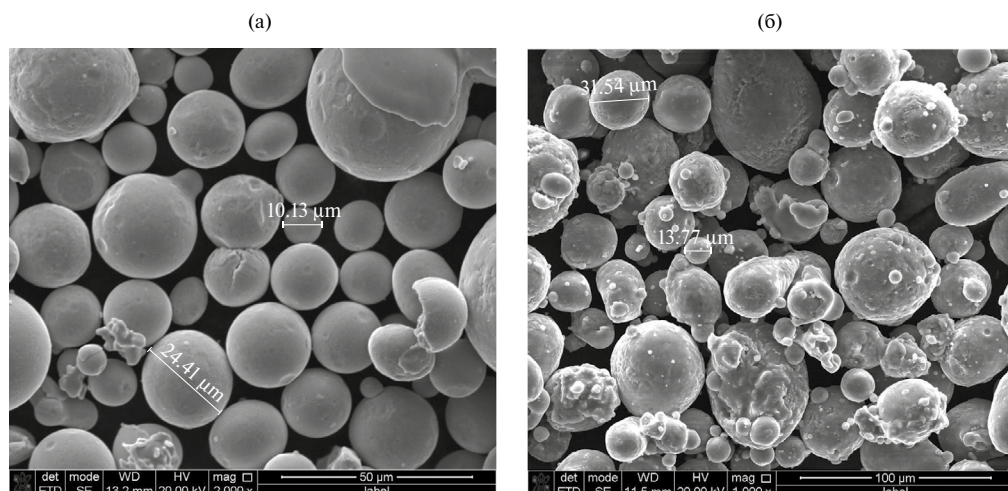


Рис. 1. Микрофотографии порошков: а – 12Х18Н10Т; б – AlSi10Mg.

слоя ( $h$ ) 50 мкм, мощность ( $P$ ) 235 Вт, скорость сканирования ( $V$ ) 700 мм/с. Для AlSi10Mg: толщина слоя ( $h$ ) 60 мкм, мощность ( $P$ ) 370 Вт, скорость сканирования ( $V$ ) 1650 мм/с. Образцы представляли собой призму размером 55x10x2.5 мм. Обработку давлением проводили на лабораторном прокатном стане по технологии продольной прокатки. Количество проходов – 4, максимальное абсолютное обжатие – 1.521 мм.

Механические свойства оценивались по твердости HRB при помощи стационарного твердомера TP 5006 в соответствии с ГОСТ 9013-59. При прокатывании образцов из алюминиевого сплава AlSi10Mg после первого прохода с обжатием 0.701 мм было зафиксировано повышение твердости на 10.5% – с 76 HRB до 84 HRB. Однако по краям отмечено образование трещин. После второго прохода с обжатием 1.101 мм произошло дальнейшее раскрытие трещин, что привело к частичному разрушению образцов. Последующие проходы для материала AlSi10Mg не осуществлялись.

Оценку высотной деформации образцов из сплава 12X18H10T проводили с помощью истинной (логарифмической) высотной деформации:

$$\varepsilon h_i = \ln(\eta_i) = \ln\left(\frac{h_i}{h_0}\right),$$

где  $\eta_i$  – коэффициент обжатия;  $h_0$  – толщина образца до прохода;  $h_i$  – толщина образца после прохода.

Для оценки объемной деформации вычисляли сумму высотной ( $\varepsilon_p$ ), поперечной ( $\varepsilon_B$ ) и продольной ( $\varepsilon_L$ ) деформаций  $\varepsilon_h + \varepsilon_B + \varepsilon_L$ . Полученные значения приведены в Таблице 1, из которой видно уплотнение материала в процессе ОД.

Также механические свойства образцов в исходном состоянии и после обработки давлением (только для материала 12X18H10T, поскольку AlSi10Mg в процессе ОД был разрушен) оценивались по изгибной прочности. Для AlSi10Mg исследования осуществлялись в соответствии с ГОСТ 18228-94, для 12X18H10T – по ГОСТ 14019-2003. Перемещение при этом фиксировалась при помощи индикатора часового типа. Результаты испытаний на изгиб исходных образцов приведены в Таблице 2.

Ранее авторами были проведены исследования радиального сжатия кольцевых образцов, изготовленных при аналогичных технологических параметрах [13]. Для

**Таблица 1.** Значения деформации полученного SLM материала 12X18H10T в зависимости от степени обжатия.

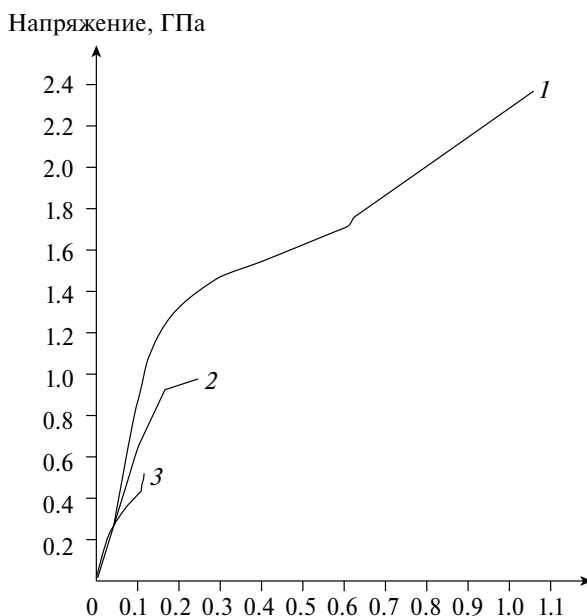
Деформация	№ прохода				
	0	1	2	3	4
$\varepsilon_h$	0	-0.174	-0.514	-0.793	-0.913
$\varepsilon_B$	0	0.016	0.048	0.062	0.073
$\varepsilon_L$	0	0.131	0.409	0.728	0.819
$\varepsilon_h + \varepsilon_B + \varepsilon_L$	0	-0.028	-0.056	-0.003	-0.021

**Таблица 2.** Результаты испытаний на изгиб исходных призматических образцов.

Образец	Нагрузка, кгс	Напряжение, МПа
12X18H10T	851	7530
AlSi10Mg	66	518

придания нагрузки использовался испытательный гидравлический пресс ПСУ-50, для измерения нагрузки – динамометр системы Токаря ГОСТ 9500-84. Изменение формы образцов во время приложения нагрузки аналогично фиксировалось при помощи индикатора часового типа. По результатам исследований установлено, что предел прочности порошкового материала AlSi10Mg при радиальном сжатии составляет ~950 МПа. Материал 12X18H10T характеризуется повышенной пластичностью – в случае радиального сжатия при нагрузке ~800 кгс наблюдается сплющивание образцов без разрушения. На Рис. 2 представлен график зависимости между напряжением и деформацией образцов из сплавов AlSi10Mg и 12X18H10T при радиальном сжатии, а также образцов из сплава AlSi10Mg при изгибе. На графике наблюдается плавное изменение формы под приложением нагрузки для материала AlSi10Mg, а для 12X18H10T – наличие критического напряжения, при достижении которого наблюдается увеличение динамики деформации.

На Рис. 3 представлены РЭМ–изображения изломов образцов из порошкового материала AlSi10Mg. Разрушение образцов, находящихся в исходном состоянии (не подвергавшимся прокатке после SLM), произошло во время про-



**Рис. 2.** Зависимость между напряжением и деформацией материалов: 1 – 12X18H10T при радиальном сжатии; 2 – AlSi10Mg при радиальном сжатии; 3 – AlSi10Mg при изгибе.

ведения исследования на изгибную прочность, а холоднодеформированных – во время осуществления второго прохода прокатки. Как показано на Рис. 3, прокатанный образец имеет более однородную структуру по сравнению с образцом в исходном состоянии, что свидетельствует о положительном влиянии обработки давлением (в определенных пределах) на плотность материала AlSi10Mg, полученного методом SLM.

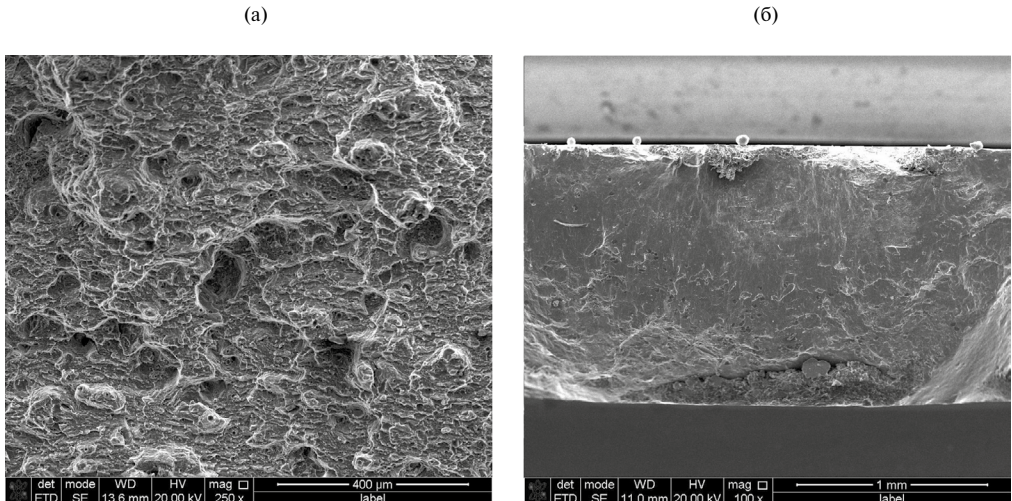


Рис. 3. РЭМ-изображение излома образца из материала AlSi10Mg: а – в исходном состоянии; б – после прокатки.



Рис. 4. Зависимость твердости порошкового материала 12X18H10T от высотной деформации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе высказана и подтверждена результатами экспериментов гипотеза о взаимозависимости высотной деформации и твердости холоднодеформированного материала 12X18H10T, полученного SLM. Твердость образцов повышалась с каждым последующим проходом. Также анализ результатов экспериментальных исследований показал, что наиболее интенсивный рост твердости наблюдается на начальном этапе прокатки. Выявленную закономерность можно объяснить повышенными абсолютными значениями объемной деформации на начальном этапе прокатки пористого порошкового материала. График зависимости твердости от высотной деформации представлен на Рис. 4.

После прокатки наблюдается скругление торцов, проявляющее все более явно с увеличением степени обжатия образцов. Причем, в случае сплава 12X18H10T, скругление более выражено по причине большей пластичности материала по сравнению с AlSi10Mg.

В процессе прокатки закономерность влияния абсолютных значений высотной деформации  $|\epsilon_h|$  на твердость порошкового материала, полученного по комбинированной технологии SLM, описываются сигмоидальной зависимостью при повышенных значениях коэффициента детерминации ( $r^2 = 0.971$ ):

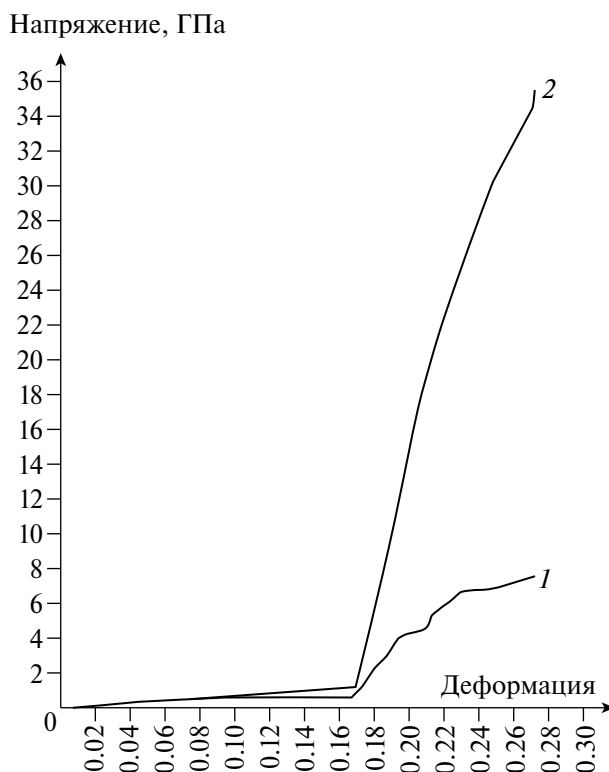


Рис. 5. Зависимость между напряжением и деформацией образцов из 12X18H10T: 1 – в исходном состоянии; 2 – после продольной прокатки.

$$\text{HRB} = a + b / \left( 1 + \exp\left(-\frac{|\varepsilon_h| - c}{d}\right) \right),$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – параметры уравнения ( $a = -187.8$ ;  $b = 300.8$ ;  $c = -0.355$ ;  $d = 0.131$ ). Значения параметра  $c$  характеризуют величину высотной деформации  $|\varepsilon_h^{\text{KP}}|$ , завершающей начальный этап интенсивного повышения твердости.

Испытания на изгиб прокатанных образцов из материала 12X18H10T показали воспринимаемую нагрузку  $\sim 703$  кгс. На Рис. 5 изображен график зависимости между напряжением и деформацией образцов в исходном состоянии и после осуществления продольной прокатки. На графике видно наличие критического напряжения, после прохождения которого наблюдается снижение динамики деформации.

За счет уменьшившейся толщины прокатанный образец имеет на 17.4% более низкое сопротивление изгибной силе, по сравнению с исходными образцами. Однако стоит отметить, что при этом он обладает большей на 9.9% упругостью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высказана и подтверждена результатами экспериментов гипотеза о взаимозависимости высотной деформации и твердости холоднодеформированного материала 12X18H10T, полученного SLM. Для порошкового материала AlSi10Mg также справедлива данная гипотеза, при условии осуществления высотной деформации до момента зарождения трещин критической величины.

Установлен предел прочности порошкового материала AlSi10Mg: 950 МПа при радиальном сжатии и 518 МПа при изгибе. Зафиксированы максимальные изгибные нагрузки для сплава 12X18H10T, полученного SLM: 851 кгс в исходном состоянии и 703 кгс в прокатанном, напряжения при этом 7530 МПа и 35443 МПа соответственно.

Построен график зависимости между напряжением и деформацией, из которого видна похожая динамика изгиба до и после продольной прокатки порошкового материала 12X18H10T. После обработки давлением отмечено снижение сопротивления изгибной силе на 17.4% по сравнению с исходными образцами, но при этом повышение твердости на 22.3% и упругих свойств на 9.9%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев С.Н., Бошканец Д.А. Технологии селективного лазерного сплавления металлов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. №3. С. 23–33.
2. Смелов В.Г., Агаповичев А.В., Сотов А.В., Хаймович А.И., Кирилин А.С. Способ получения деталей из алюминиевых сплавов методом селективного лазерного сплавления. Патент РФ № 2728450. 2019.
3. Дынин Н.В., Заводов А.В., Оглодков М.С., Хасиков Д.В. Влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg // Труды ВИАМ. 2017. №10. С. 3–14.



4. Сироткин О.С., Рыцев С.Б., Тимофеев А.И., Филиппов Е.И. Способ спекания при лазерном послыном порошковом синтезе объемных деталей. Патент РФ № 2423203. 2011.
5. Бабенцова Л.П., Анциферова И.В. Изучение характеристик механических свойств образцов из сплава РН1, полученных методом селективного лазерного спекания // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2019. **21**, № 2. С. 31–39.
6. Коновалов С.В., Носова Е.А., Смелов В.Г., Осинцев К.А. Способ формирования композиционного материала методом селективного лазерного плавления порошка жаропрочного никелевого сплава на подложке из титанового сплава. Патент РФ № 2713255. 2020.
7. Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В., Кяримов Р.Р. Способ получения деталей из жаропрочных никелевых сплавов, включающий технологию селективного лазерного сплавления и термическую обработку. Патент РФ № 2674685. 2018.
8. Хмыров Р.С., Тарасова Т.В., Гусаров А.В., Котобан Д.В., Хмырова Н.Д. Способ получения изделий из порошкового материала 94WC6Co. Патент РФ № 2669034. 2009.
9. Хмыров Р.С., Тарасова Т.В., Гусаров А.В., Котобан Д.В., Хмырова Н.Д. Способ изготовления изделий селективным лазерным плавлением порошковой композиции WC-Co. Патент РФ № 2669135. 2018.
10. Сухов Д.И., Мазалов П.Б., Неруш С.В., Ходырев Н.А. Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионностойкой стали // Труды ВИАМ. 2017. №8. С. 34–44.
11. Борисов Е.В. Формирование заданной структуры турбинной лопатки из жаропрочного никелевого сплава методом селективного лазерного плавления: автореф... дис. кан. техн. наук. – СПб.: 2017. С. 26.
12. Жигжитова С.Б. Применение растровой электронной микроскопии для исследования структуры материалов / Методическое указание для студентов, магистров технических и технологических специальностей 150100. 151005, 260200, 270100. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ. 2011.
13. Бошканец Д.А., Сергеенко С.Н. Пористость порошкового материала, полученного селективным лазерным сплавлением / Студенческая научная весна-2023: сборник материалов региональной научно-технической конференции (конкурса научно-технических работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области, г. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ). 2023. С. 34.

## PROPERTIES OF COLD-DEFORMED POWDER MATERIALS 12CR18NI10TI AND ALSI10MG OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING

**D. A. Boshkanets\*, S. N. Sergeenko\*\***

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia*

*\*E-mail: boshkanetsda@gmail.com*

*\*\*E-mail: sergeenko@gmail.com*

The article considers a combined technology which mixes selective laser melting (SLM) and longitudinal rolling of powder materials 12Cr18Ni10Ti and AlSi10Mg. The objective of the work is to experimentally establish the regularities of pressure treatment on the mechanical characteristics of the obtained SLM materials, namely on hardness and bending strength. A literature review was prepared, based on the information from which a batch of test samples were made from powders of stainless steel 12Cr18Ni10Ti and aluminum alloy AlSi10Mg. Pressure treatment of the resulting

samples was performed using longitudinal rolling technology. The assessment of the high-altitude deformation of the 12Cr18Ni10Ti alloy samples was carried out using true (logarithmic) high-altitude deformation. The morphology of the raw materials was studied using an electron microscope. The mechanical properties of the materials were assessed by HRB hardness and bending strength. The results of radial compression tests on annular samples manufactured under similar technological parameters were analyzed additionally. Based on the results of the analysis, the dependence between stress and deformation was established, where for AlSi10Mg there is a smooth shape change under load, and for 12Cr18Ni10Ti there is a critical stress, at which an increase in deformation dynamics is observed. Scanning electron microscopy of the fractures of the AlSi10Mg material showed a more homogeneous structure of the rolled sample compared to the sample in the initial state, which is evidence of the positive effect of pressure treatment (within certain limits) on the density of the AlSi10Mg material obtained by the SLM method. Based on the results of the researches, a hypothesis about the interdependence of high-altitude deformation and hardness of the cold-deformed material 12Cr18Ni10Ti obtained by SLM was formulated and confirmed by the results of experiments. The bending strength limit of the AlSi10Mg powder material was established and the maximum bending loads for the 12Cr18Ni10Ti alloy was fixed. The dependences between stress and deformation of materials under radial compression and bending are shown. It has been found that longitudinal rolling of 12X18H10T powder material helps to reduce the resistance to bending force, but at the same time the hardness and elastic properties increase.

*Keywords:* powder metallurgy, selective laser melting, pressure treatment, rolling.

## REFERENCES

1. Sergeenko S.N., Boshkanets D.A. Tekhnologii selektivnogo lazernogo splavlениya metallov [Technologies of selective laser melting of metals] // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem [Forging and stamping production. Material processing by pressure]. 2023. №3. P.23–33. [In Russian]
2. Smelov V.G., Agapovichev A.V., Sotov A.V., Hajmovich A.I., Kirilin A.S. Sposob polucheniya detalej iz alyuminiyevykh splavov metodom selektivnogo lazernogo splavlениya [Method for producing parts from aluminum alloys by selective laser melting]. Patent of the Russian Federation №2728450. 2019. [In Russian]
3. Dynin N.V., Zavodov A.V., Oglodkov M.S., Hasikov D.V. Vliyanie parametrov processa selektivnogo lazernogo splavlениya na strukturu alyuminiyevogo splava sistemy Al-Si-Mg [The influence of the parameters of the selective laser melting process on the structure of the aluminum alloy of the Al-Si-Mg system] // Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]. 2017. №10. P. 3–14. [In Russian]
4. Sirotkin O.S., Rycев S.B., Timofeev A.I., Filippov E.I. Sposob spekaniya pri lazernom poslojnom poroshkovom sinteze ob"emnykh detalej [Method of sintering in laser layer-by-layer powder synthesis of volumetric parts]. Patent of the Russian Federation №2423203. 2011. [In Russian]
5. Babencova L.P., Anciferova I.V. Izuchenie harakteristik mekhanicheskikh svoystv obrazcov iz splava PH1, poluchennykh metodom selektivnogo lazernogo spekaniya [Study of the characteristics of mechanical properties of PH1 alloy samples obtained by selective laser sintering] // Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie [Bulletin of PNIPU. Mechanical Engineering, Materials Science.]. 2019. 21. №2. P. 31–39. [In Russian]
6. Konovalov S.V., Nosova E.A., Smelov V.G., Osincev K.A. Sposob formirovaniya kompozitsionnogo materiala metodom selektivnogo lazernogo plavlениya poroshka zharoprochnogo nikellevogo

- splava na podlozhe iz titanovogo splava [Method for forming a composite material by selective laser melting of heat-resistant nickel alloy powder on a titanium alloy substrate]. Patent of the Russian Federation №2713255. 2020. [In Russian]
7. Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V., Kyarimov R.R. Sposob polucheniya detalej iz zharoprochnyh nikelovykh splavov, vklyuchayushchij tekhnologiyu selektivnogo lazernogo splavljeniya i termicheskuyu obrabotku [Method for producing parts from heat-resistant nickel alloys, including selective laser melting technology and heat treatment]. Patent of the Russian Federation №2674685. 2018. [In Russian]
  8. Hmyrov R.S., Tarasova T.V., Gusarov A.V., Kotoban D.V., Hmyrova N.D. Sposob polucheniya izdelij iz poroshkovogo materiala 94WC6Co [Method for producing products from 94WC6Co powder material]. Patent of the Russian Federation №2669034. 2009. [In Russian]
  9. Hmyrov R.S., Tarasova T.V., Gusarov A.V., Kotoban D.V., Hmyrova N.D. Sposob izgotovleniya izdelij selektivnym lazernym plavljeniem poroshkovej kompozicii WC-Co [Method for manufacturing products by selective laser melting of WC-Co powder composition]. Patent of the Russian Federation №2669135. 2018. [In Russian]
  10. Suhov D.I., Mazalov P.B., Nerush S.V., Hodyrev N.A. Vliyanie parametrov selektivnogo lazernogo splavljeniya na obrazovanie poristosti v sintezirovannom materiale korrozionnostojkoj stali [Influence of selective laser melting parameters on the formation of porosity in the synthesized material of corrosion-resistant steel] // Trudy VIAM [Proceedings of VIAM] 2017. №8. 2017. P.34–44. [In Russian]
  11. Borisov E.V. Formirovanie zadannoj struktury turbinnoj lopatki iz zharoprochnogo nikelovogo splava metodom selektivnogo lazernogo plavljeniya [Formation of a given structure of a turbine blade from a heat-resistant nickel alloy by the method of selective laser melting]: avtoref... dis. kan. tekhn. nauk [author's abstr... dis. can. tech. sciences]. SPb.: 2017. P. 26. [In Russian]
  12. Zhigzhitova S.B. Primenenie rastrovoj elektronnoj mikroskopii dlya issledovaniya struktury materialov [Application of scanning electron microscopy for studying the structure of materials] // Metodicheskoe ukazanie dlya studentov, magistriv tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh special'nostej 150100. 151005, 260200, 270100 [Methodical instructions for students, masters of technical and technological specialties 150100. 151005, 260200, 270100]. Ulan-Ude: Publishing house of VSGTU. 2011. [In Russian]
  13. Boshkanets D.A., Sergeenko S.N. Poristost' poroshkovogo materiala, poluchennogo selektivnym lazernym splavljeniem [Porosity of powder material obtained by selective laser melting] // Student scientific spring-2023: collection of materials of the regional scientific and technical conference (competition of scientific and technical works) of students, graduate students and young scientists of universities of the Rostov region, Novocherkassk: SUSU (NPI). 2023. P. 34. [In Russian]