

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.671/673
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-150-160>

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

А. Ф. Ильющенко

Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ И МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Аннотация. Приводятся результаты исследования характеристик специальных порошков металлических сплавов и материалов, полученных из этих порошков методом селективного лазерного сплавления (SLM), в том числе данные сравнительного анализа характеристик порошков, изготовленных по технологии VIGA с использованием установки вакуумной индукционной плавки. Отмечается важность проведения комплекса исследований, включающего не только статистическую оценку распределения частиц порошков по размерам (предпочтительно методом дифракции лазерного излучения), но и анализ изображений, который позволяет получать информацию о форме частиц, определяющей текучесть порошков. Показано, что распределение по размерам и фактор формы порошков никелевых жаропрочных сплавов и нержавеющей стали, полученных в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси, находятся на уровне лучших зарубежных аналогов. Рассмотрено влияние химического состава порошков на механические свойства образцов, изготовленных методом SLM. Наличие кислорода и нежелательных примесей, как правило, приводит к снижению прочности и относительного удлинения формируемых образцов. Отмечается, что данный метод предоставляет исключительно широкие возможности для формирования сложных геометрических структур с близкой к теоретической плотностью. Последующая термическая или термомеханическая обработка позволяет снимать напряжения, возникающие в процессе SLM, доуплотнять изделия (при необходимости) и регулировать их структуру и свойства. Показана перспективность применения метода дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОЭ) для анализа эволюции структуры материалов в процессе SLM и последующей обработки. Отмечается, что изделия, полученные методом SLM из порошков специальных сплавов, демонстрируют механические свойства на уровне, а в ряде случаев превышающие свойства этих сплавов, полученных традиционными и другими аддитивными технологиями.

Ключевые слова: специальные порошки, аддитивные технологии, текучесть порошков, селективное лазерное сплавление

Для цитирования. Ильющенко, А. Ф. Исследование характеристик специальных порошков и материалов, полученных методом селективного лазерного сплавления / А. Ф. Ильющенко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Т. 63, № 2. – С. 150–160. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-150-160>

A. Ph. Ilyshchanka

Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF SPECIAL POWDERS AND MATERIALS PRODUCED BY MEANS OF SELECTIVE LASER MELTING

Abstract. The article presents the results of characterization of special powders of metal alloys and materials produced from these powders by selective laser melting (SLM), including comparative analysis of powders produced using VIGA technology. It is noted the importance of a complex study that includes not only a statistical evaluation of particle size distribution of the powders (preferably, by the method of laser diffraction), but also image analysis providing information on the particles' shape influencing the powders' flowability. It is shown that the size distribution and shape metrics for nickel refractory alloys and stainless steel powders obtained at the Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus are at the level of the best foreign analogues. The influence of powder chemical composition on the mechanical properties of SLM samples is considered. The presence of oxygen and undesirable impurities, as a rule, decreases the strength and tensile strain. It is noted that SLM provides extremely wide opportunities for the formation of complex geometric structures with close to full density. Subsequent thermal or thermal and mechanical processing allows reduction of stresses arising during the SLM, densification of products (if necessary) and regulation of their structure and properties. The prospects of applying the back-

scattered electron diffraction (EBSD) for analysis of the material structure evolution during SLM and subsequent processing are shown. It is noted that products obtained by the SLM from the powders of special alloys exhibit mechanical properties at a level, and in some cases even exceeding the properties of these alloys produced by traditional and other additive technologies.

Keywords: special powders, additive technologies, flow rate of powder, selective laser melting

For citation. Ilyshchanka A. Ph. Investigation of characteristics of special powders and materials produced by means of selective laser melting. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 2, pp. 150–160 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-150-160>

Введение. Селективное лазерное сплавление (Selective Laser Melting – SLM) является одной из наиболее распространенных технологий послойного выращивания изделий, предоставляющей исключительно широкие возможности для изготовления сложных геометрических структур [1–5]. Сущность процесса заключается в послойном селективном сканировании лазером поверхности платформы, заполненной свободно насыпанным порошком, вследствие чего происходит сплавление частиц между собой и с нижележащим материалом. Технологические особенности процесса определяют очень жесткие требования к размерам частиц, морфологии и химическому составу используемых порошков, а высокие скорости нагрева и охлаждения, однонаправленный тепловой поток, повторяющиеся циклы нагрева и охлаждения обуславливают формирование текстуры и высокие напряжения в формируемых изделиях, приводя к необходимости проведения последующей термической обработки [1–8].

Целью настоящей работы является исследование характеристик специальных порошков металлических сплавов и материалов, полученных из порошков методом SLM.

Анализ характеристик порошков для SLM. Принято считать, что основными характеристиками, обеспечивающими возможность достижения близкой к теоретической плотности порошковых изделий, получаемых платформенными аддитивными методами, являются сферическая форма частиц и оптимизация распределения частиц по размерам под конкретную технологию [9]. Большая часть металлических порошков, используемых для SLM, находится в диапазоне размеров от 20 до 60 мкм, что и должно обеспечивать возможность формирования равномерно гладкого слоя требуемой толщины. Такие тонкие порошки характеризуются невысокой текучестью, поэтому для улучшения этого параметра, как правило, используются порошки формы, близкой к сферической.

Традиционный ситовый анализ затруднен и не обеспечивает достаточной воспроизводимости результатов для порошков размером менее 45 мкм. Кроме того, размер частиц, определяемый по размеру ячейки сита, не коррелирует с формой частиц, например, при просеивании частиц вытянутой формы, что может служить источником ошибок. Благодаря высокой скорости и производительности метод дифракции лазерного излучения является в настоящее время основным для анализа распределения частиц порошков по размерам. Однако результаты расчетов аппроксимируются эквивалентным диаметром сферических частиц и не учитывают реальной формы частиц. Поэтому ведущие фирмы – производители порошков для SLM наряду с применением лазерных анализаторов размеров частиц используют анализ изображений, позволяющий получать информацию о форме порошковых частиц.

В [10] представлены результаты сравнительного анализа двух промышленных порошков сплава AlSi10Mg, полученных двумя различными методами распыления расплава газовой струей. По данным лазерной дифракции, оба порошка имеют приблизительно одинаковое распределение по размерам (рис. 1), однако порошок первой партии (партия 1) демонстрирует текучесть порядка 80 с, в то время как порошок второй партии (партия 2) не течет через воронку стандартного размера (табл. 1). Это различие объясняется сравнительным анализом формы частиц, представленным в табл. 2.

Таким образом, основными контролируемыми характеристиками порошков для SLM являются распределение частиц по размерам, форма и текучесть порошков с обязательным анализом изображений частиц.

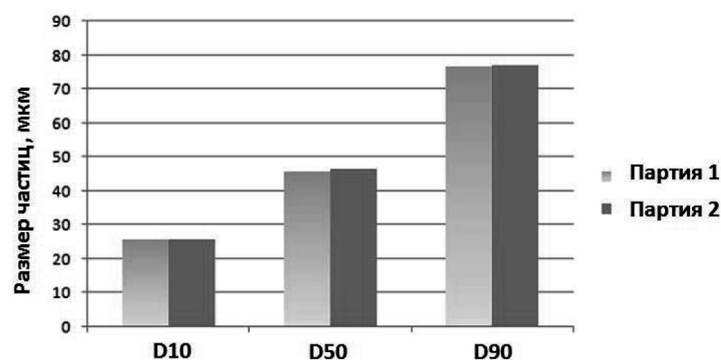


Рис. 1. Результаты определения размера частиц промышленных порошков сплава AlSi10Mg методом лазерной дифракции (D10 – 10 % частиц имеют размер менее указанного; D50 – 50 % частиц имеют размер менее указанного; D90 – 90 % частиц имеют размер менее указанного)

Fig. 1. Results of particle size determination of industrial powders of AlSi10Mg alloy by laser diffraction (D10 – 10 % of the particles have a size smaller than that indicated, D50 – 50 % of the particles have a size smaller than that indicated, D90 – 90 % of the particles have a size less than specified)

Таблица 1. Результаты определения текучести промышленных порошков сплава AlSi10Mg

Table 1. Results of flow rate determination of industrial powders of AlSi10Mg alloy

Тест №	Текучесть, с	
	партия 1	партия 2
Тест 1	80,8	Не течет
Тест 2	79,3	Не течет
Тест 3	79,9	Не течет
Среднее значение	80,0	Не течет

Таблица 2. Результаты анализа формы частиц промышленных порошков сплава AlSi10Mg

Table 2. Analysis results of the particle shape of industrial powders of AlSi10Mg alloy

Значение	Расчет по параметру «удлинение» (Elongation)		Расчет по параметру «сферичность» (HS Circularity)		Расчет по параметру «выпуклость» (Convexity)	
	партия 1	партия 2	партия 1	партия 2	партия 1	партия 2
Минимальное	0	0	0,189	0,162	0,755	0,694
Максимальное	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0
Среднее	0,122	0,154	0,943	0,933	0,996	0,996
D10	0	0,014	0,84	0,818	0,964	0,973
D50	0,09	0,113	0,962	0,962	0,992	0,994
D90	0,288	0,361	0,992	0,992	0,997	0,998

Для разработки и исследования процессов получения порошков для SLM в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси смонтирована и запущена в эксплуатацию установка вакуумной индукционной плавки и распыления расплава инертным газом (технология VIGA) JT-QWH-25KG (рис. 2). Основные технические характеристики установки представлены в табл. 3.

На рис. 3 показана морфология порошков никелевого жаропрочного сплава Inconel 718 и нержавеющей стали 316 L, полученных в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси на указанной установке по технологии VIGA. На рис. 4 представлена гистограмма распределения частиц распыленного порошка Inconel 718 фракции +5–40 мкм по размерам, а в табл. 4 суммированы результаты определения размера и формы частиц распыленного порошка сплава Inconel 718 в зависимости от фракции.



Рис. 2. Установка вакуумной индукционной плавки и распыления расплава инертным газом марки JT-QWH-25KG

Fig. 2. Equipment for vacuum induction melting and inert gas atomization JT-QWH-25KG

Таблица 3. Основные технические характеристики установки JT-QWH-25KG
Table 3. The main technical specifications of JT-QWH-25KG

Параметр	Значение
Объем загрузки	25 кг (для стали)
Мощность и частота индукционного нагревателя	100 кВт, 4 кГц
Температура в раздаточном тигле	1200–1700 °С
Рабочее давление вакуума, не более	0,66 Па
Максимальное давление в распылительной камере	6 МПа
Температура в плавильном тигле	≤ 2200 °С
Газы, используемые для распыления	Ar, N ₂

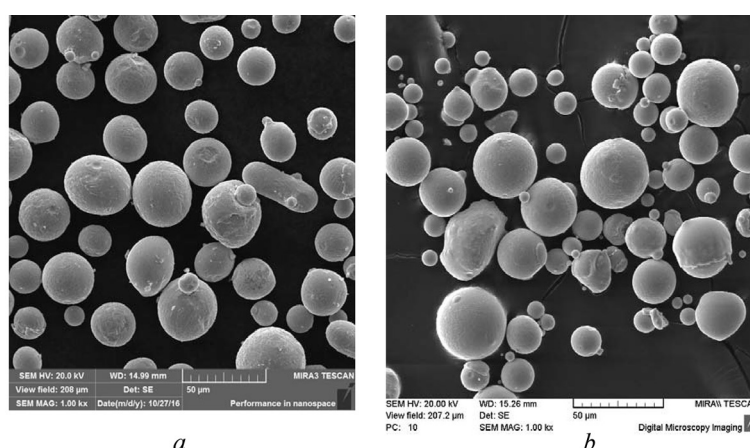


Рис. 3. Морфология распыленных порошков никелевого жаропрочного сплава и нержавеющей стали, полученных по технологии VIGA в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси: *a* – Inconel 718, фракция +5–40 мкм; *b* – 316 L, фракция –40 мкм

Fig. 3. Morphology of atomized powders of nickel refractory alloy and stainless steel produced by VIGA technology at the Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus: *a* – Inconel 718, fraction + 5–40 μm; *b* – 316 L, fraction – 40 μm

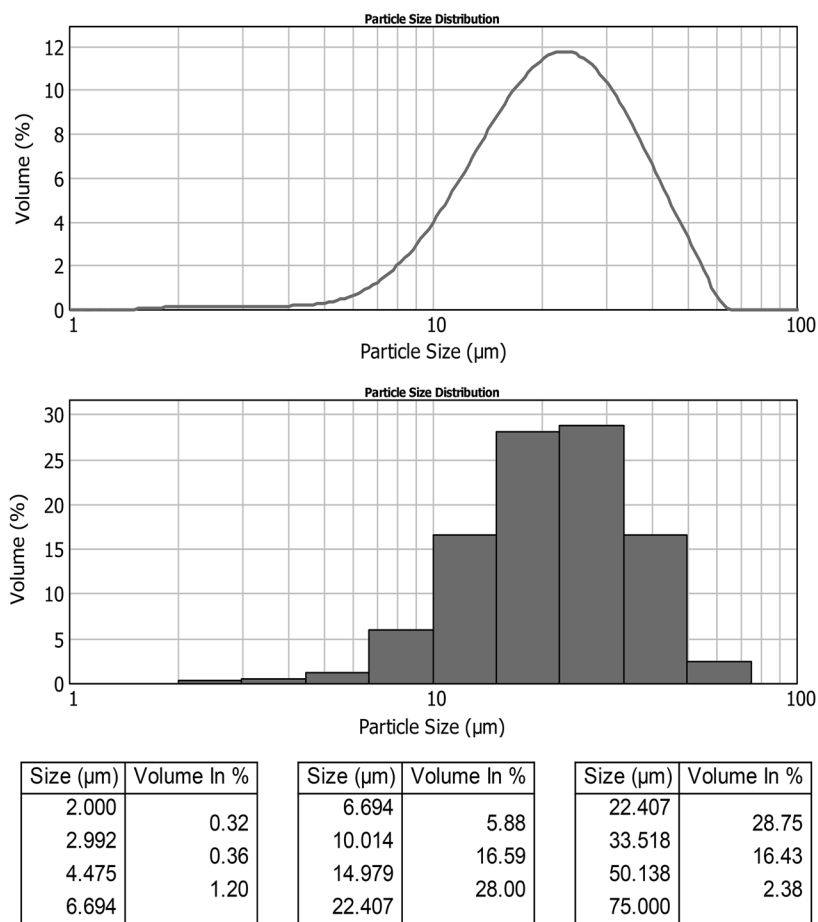


Рис. 4. Распределения частиц распыленного порошка Inconel 718 фракции +5–40 мкм по размерам
 Fig. 4. The particle distributions of the atomized Inconel 718 powder of fraction +5–40 μm in size

Таблица 4. Результаты определения формы и размеров частиц распыленных порошков никелевого жаропрочного сплава Inconel 718, полученных по технологии VIGA в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси

Table 4. Results of shape and particle size determination of atomized powders of the nickel refractory Inconel 718 alloy produced by VIGA technology at the Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

Параметры формы и размеров частиц порошков	Фракция, мкм		
	+5–40	+40–63	+63–100
D10, мкм	12,9–20,8	37,8–41,0	61,7–69,4
D50, мкм	25,7–30,5	50,8–55,8	84,6–95,2
D90, мкм	42,8–49,5	67,7–76,6	116,6–130,8
Фактор формы	0,91–0,92	0,86–0,88	0,82–0,83

Анализ полученных результатов показывает, что распределение по размерам и фактор формы полученных порошков находятся на уровне лучших зарубежных аналогов.

Еще одной важной характеристикой порошков для SLM является их химический состав. В [11] представлены сравнительные результаты селективного лазерного сплавления порошков нержавеющей стали 316 L, полученных распылением инертным газом (рис. 5, а) и водой (рис. 5, б). Кроме несферической формы, обуславливающей более низкую текучесть и насыпную плотность, в распыленных водой порошках содержится больше кислорода и нежелательных примесей (табл. 5). Это сказывается на механических свойствах формируемых изделий, в первую очередь

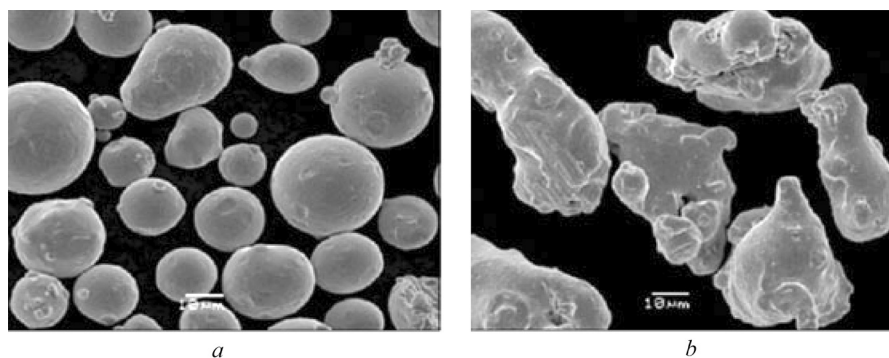


Рис. 5. Морфология поверхности порошков нержавеющей стали 316 L, полученных распылением инертным газом (а), водой (b) [11]

Fig. 5. Surface powder morphology of 316 L stainless steel produced by atomizing with inert gas (a), water (b) [11]

временном сопротивлении и относительном удлинении. Даже после модифицирования параметров SLM основные механические свойства образцов, полученных из порошков более низкого качества, остаются чуть ниже (табл. 6).

Для разработки технологий изготовления и организации производства методом SLM образцов и изделий для аэрокосмической и специальной техники в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси смонтирован и запущен в эксплуатацию металлургический 3D-принтер для селективного лазерного сплавления металлических порошков (рис. 6).

Таблица 5. Химический состав порошков нержавеющей стали 316 L [11]

Table 5. Chemical composition of 316 L stainless steel powders [11]

Способ получения	Содержание, мас.%											
	C	S	O	N	P	Mo	Si	Cr	Ni	Cu	Mn	Fe
Распыление газом	0,026	0.006	0.042	0,094	0.02	2,30	0,50	17,10	12,87	0,14	1,31	65,60
Распыление водой	0,012	0,011	0,360	0,025	0,02	2,33	0,89	17,25	12,86	0,03	0,07	66,15

Таблица 6. Механические свойства образцов, полученных селективным лазерным сплавлением порошков нержавеющей стали 316 L [11]

Table 6. Mechanical properties of samples produced by Selective Laser Melting of 316 L stainless steel powders [11]

Способ распыления	Механические свойства				
	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, ГПа	σ_B , ГПа	δ , %	HRB
Газом	147±14	483±26	624±10	34±1	94
Водой	150±9	475±16	611±7	32±3	89



Рис. 6. Внешний вид 3D-принтера ProX DMP 300 (а), рабочая платформа принтера с образцами построенных деталей (b)

Fig. 6. 3D printer ProX DMP 300 (a), working platform of the printer with samples of the built parts (b)

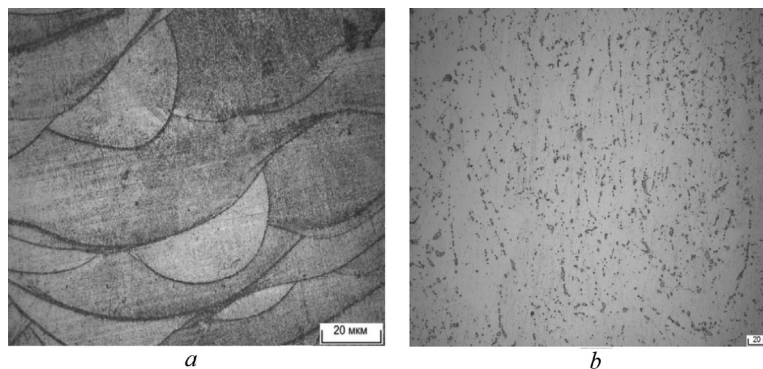


Рис. 7. Оптические микрофотографии поперечного сечения SLM-образца из порошка жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до (a) и после (b) ГИП
 Fig. 7. Optical micrographs of the cross-section of the SLM sample made of powder of Inconel 718 refractory nickel alloy before HIP (a) and after HIP (b)

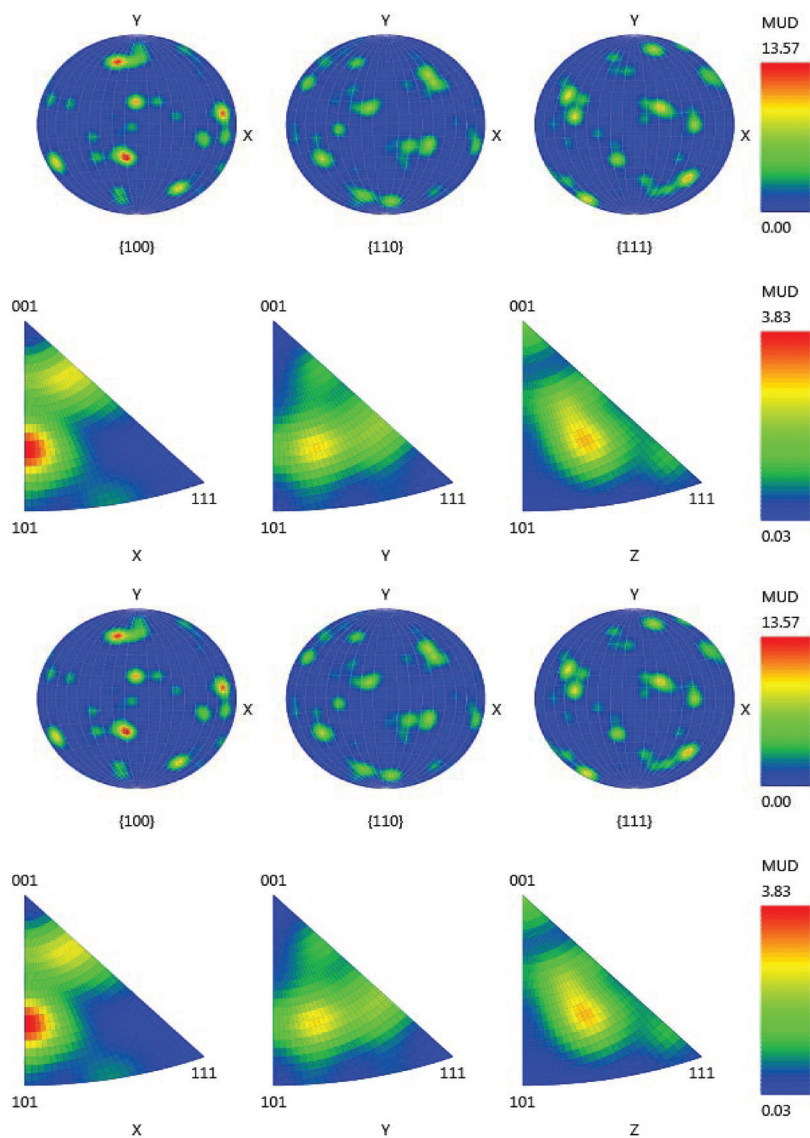


Рис. 8. Прямая и обратная полюсные фигуры для γ -твёрдого раствора на основе Ni с г.ц.к. решеткой в SLM-образце из никелевого жаропрочного сплава Inconel 718
 Fig. 8. Direct and reverse pole figures for the γ -solid solution based on Ni with fcc lattice in SLM sample made of Inconel 718 nickel refractory alloy

Следует отметить, что при селективном лазерном сплавлении большинства металлических сплавов, включая высоколегированные жаропрочные сплавы, возможно достижение плотности порядка 95–99 % (в некоторых случаях – до 100 %) от теоретической. Однако для снятия напряжений, возникающих в процессе обработки, доуплотнения (при необходимости) и обеспечения высоких механических свойств, как правило, требуется последующая термическая либо термо-механическая обработка изделий после SLM. Для титановых сплавов применяют термическую обработку в вакуумной печи или в среде инертного газа [12] либо используют горячее изостатическое прессование (ГИП). Для никелевых жаропрочных сплавов, как правило, применяют ГИП с последующим старением [13].

На рис. 7 представлена микроструктура SLM-образца из распыленного порошка жаропрочного никелевого сплава Inconel 718 до и после ГИП. Последующая обработка образцов методом ГИП позволила не только обеспечить рекристаллизацию и формирование однородной структуры, характерной для порошковых материалов, получаемых методом ГИП, но и повысить плотность SLM-образцов до теоретической.

Более детальную информацию о фазовых и структурных превращениях в SLM-образцах до и после обработки можно получить с помощью метода дифракции обратно-рассеянных электронов (ДОО). В частности, анализ прямых и обратных полюсных фигур (рис. 8) позволяет определить направление преимущественной ориентации зерен относительно направления построения, которое в данном случае соответствует (100). Сравнительный анализ карт ДОО (рис. 9) является

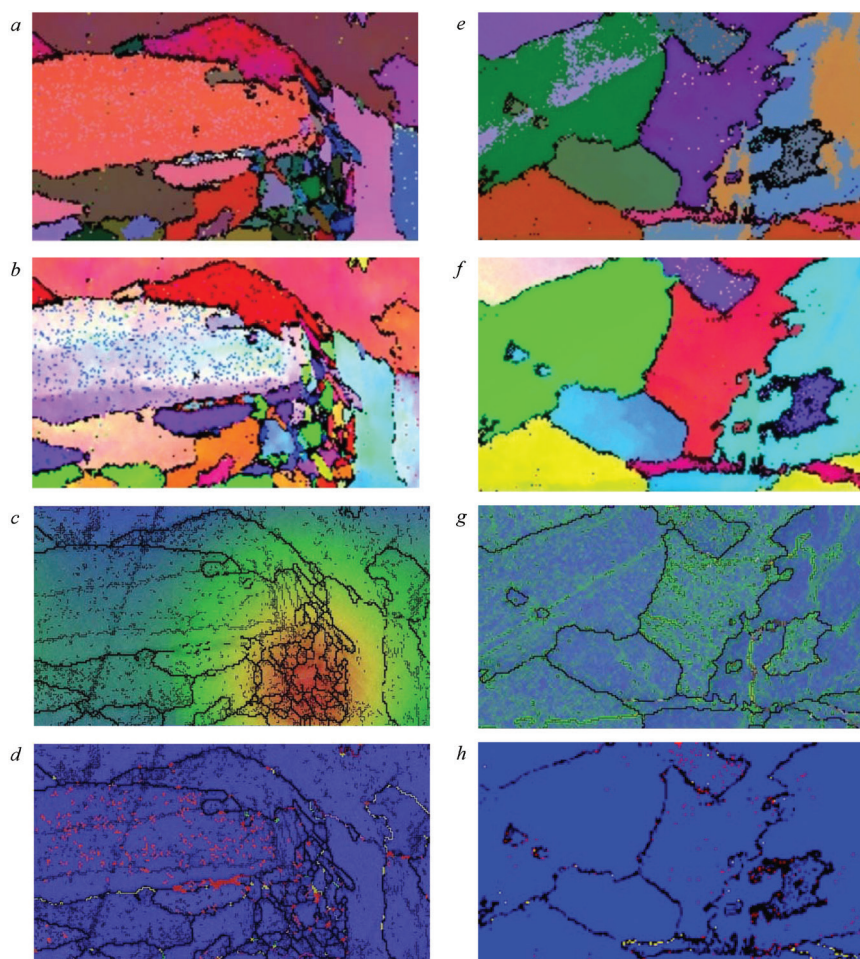


Рис. 9. Карты ДОО SLM-образца из никелевого жаропрочного сплава Inconel 718 до (*a–d*) и после ГИП (*e–h*): *a, e* – цвета Эйлера; *b, f* – разориентация кристаллов относительно плоскости Z; *c* – внутренние напряжения + границы зерен; *g* – локальные деформации + границы зерен; *d, h* – распределение фаз + границы зерен

Fig. 9. DOE maps of the SLM sample made of Inconel 718 nickel refractory alloy before HIP (*a–d*) and after HIP (*e–h*): Euler colors (*a, e*), misorientation of the crystals with respect to Z plane (*b, f*), internal stresses + grain boundaries (*c*), local deformations + grain boundaries (*g*), phase distribution + grain boundaries (*d, h*)

полезным для контроля процессов рекристаллизации, выявления областей с повышенной локальной деформацией и др.

В табл. 7 представлены сравнительные механические свойства изделий из наиболее широко применяемых в настоящее время в аддитивных технологиях металлических сплавов [14].

Таблица 7. Механические свойства изделий из наиболее широко применяемых в настоящее время в аддитивных технологиях металлических сплавов [14]

Table 7. Mechanical properties of products made of the most widely used metal alloys at present time in additive technologies [14]

Материал	Процесс	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %
Ti6Al4V	Горячее деформирование	951	883	14
	LMD*	1160	1160	6
	EBM**	1020	950	14
	SLM	1100	1000	8
	LENS***	1077	973	11
Inconel 718	Горячее деформирование	1407	1172	21
	LENS	1393	1117	15,8
	EBM	1238	1154	7
Inconel 625	LENS	938	548	38
17-4SS	SLM	1050	540	25
Сплав Co–Cr	EBM	960	560	20
Сплав Co–Cr–Mo	SLM	1350–1450	910–1010	9–13
316SS	Горячее деформирование	579	290	50
	LENS	655	278	66,5
	LMD	579	296	41

* LMD – объемная лазерная наплавка.

** EBM – электронно-лучевое сплавление.

*** LENS – объемная лазерная наплавка на оборудовании с торговой маркой LENSTM – Laser Engineered Net Shaping.

Как видно из таблицы, метод селективного лазерного сплавления обеспечивает возможность достижения механических свойств изделий из специальных сплавов на уровне, а в ряде случаев превышающих свойства этих сплавов, полученных традиционными и другими аддитивными технологиями.

Заключение. Метод селективного лазерного сплавления является перспективной технологией лазерной консолидации порошков металлических сплавов и обеспечивает широкие возможности создания сложных геометрических структур при близких к теоретической плотностях и высоких механических свойствах формируемых изделий. Технологические особенности метода требуют тщательного контроля характеристик исходных порошков, включающих форму и распределение частиц по размерам, текучесть и химический состав. Дополнительная термическая либо термомеханическая обработка консолидированных образцов позволяет снизить уровень термических напряжений, обусловленных особенностями процесса, повысить плотность и контролировать структуру, а следовательно, и свойства формируемых материалов.

Список использованных источников

1. Ильющенко, А. Ф. Современное состояние порошковой металлургии в Западной Европе: тенденции и перспективы / А. Ф. Ильющенко, В. В. Савич // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск, 2015. – Вып. 38. – С. 7–18.
2. Ильющенко, А. Ф. Эффективный инструмент современного машиностроения / А. Ф. Ильющенко // Наука и инновации. – 2016. – № 2. – С. 16–21.

3. Ильющенко, А. Ф. Порошковая металлургия – одна из первых аддитивных технологий / А. Ф. Ильющенко, В. В. Савич // Аддитивные технологии, материал и конструкции: материалы науч.-техн. конф., Гродно, 6–10 окт. 2016 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А. И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 20–30.
4. Ильющенко, А. Ф. Аддитивные технологии и перспективы их развития в ГНУ «Институт порошковой металлургии» / А. Ф. Ильющенко // Сборник докладов Международного научно-практического симпозиума, Минск, 24 мая 2017 г. / Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: А. Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – С. 51–65.
5. Dawes, J. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain / J. Dawes, R. Bowerman, R. Trepleton // *Johnson Matthey Technol. Rev.* – 2015. – Vol. 59, № 3. – P. 243–256. <https://doi.org/10.1595/205651315x688686>
6. Kippax, P. Size and shape optimisation of metal powders for additive manufacturing / P. Kippax, R. Deffley // *Metal Additive Manufacturing.* – 2015. – Vol. 1, № 3. – P. 75–78.
7. Hoeges, S. Additive manufacturing using water atomised steel powders / S. Hoeges, A. Zwiren, C. Schade // *Metal Power Report.* – 2017. – Vol. 72, iss. 2. – P. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2017.01.004>
8. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties / B. Vrancken [et al.] // *J. of Alloys and Compounds.* – 2012. – Vol. 541. – P. 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.022>
9. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting / W. Tillmann [et al.] // *Additive Manufacturing.* – 2017. – Vol. 13. – P. 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.006>
10. Hegab, H. A. Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys / H. A. Hegab // *Manufacturing Rev.* – 2016. – Vol. 3. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2016010>
11. Singh, S. Material issues in additive manufacturing: A review / S. Singh, S. Ramakrishna, R. Singh // *J. of Manufacturing Processes.* – 2017. – Vol. 25. – P. 185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>
12. Heynick, M. Additive manufacturing of metals: a review [Electronic resource] / M. Heynick // *Materials Science and Technology (MS&T) 2011, October 16–20, 2011, Columbus, Ohio.* – Mode of access: <https://www.asminternational.org/documents/10192/23826899/cp2011mstp1413.pdf/04f142d0-f1ca-44d4-8a10-891992e5529a> – Date of access: 19.10.2017.
13. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D. Gu [et al.] // *Inter. Mater. Rev.* – 2012. – Vol. 57, № 3. – P. 137–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411y.0000000014>
14. Frazier, W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review / W. E. Frazier // *J. Mater. Eng. Performance.* – 2014. – Vol. 23, № 6. – P. 1917–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

References

1. Il'yushchenko A. F., Savich V. V. Current state of powder metallurgy in Western Europe: trends and prospects. *Poroshkovaya metallurgiya: sbornik statei* [Powder metallurgy: collection of scientific papers]. Minsk, 2015, iss. 38, pp. 7–18 (in Russian).
2. Il'yushchenko A. F. Effective tool of modern engineering. *Nauka i innovatsii = Science and Innovations*, 2016, no. 2, pp. 16–21 (in Russian).
3. Il'yushchenko A. F., Savich V. V. Powder metallurgy is one of the first additive technologies. *Additivnye tekhnologii, material i konstruksii: materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Grodno, 5–6 oktyabrya 2016 g.* [Additive technologies, materials and constructions: materials of the scientific and technical conference, Grodno, October 6–10, 2016]. Grodno, Grodno State University Publ., 2016, pp. 20–30 (in Russian).
4. Il'yushchenko A. F. Additive technologies and prospects for their development in the State Scientific Institution “Powder Metallurgy Institute”. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma, Minsk, 24 maya 2017 g.* [Collection of reports of the International Scientific and Practical Symposium, Minsk, May 24, 2017]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 51–65 (in Russian).
5. Dawes J., Bowerman R., Trepleton R. Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. *Johnson Matthey Technology Review*, 2015, vol. 59, no. 3, pp. 243–256. <https://doi.org/10.1595/205651315x688686>
6. Kippax P., Deffley R. Size and shape optimisation of metal powders for additive manufacturing. *Metal Additive Manufacturing*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 75–78.
7. Hoeges S., Zwiren A., Schade C. Additive manufacturing using water atomised steel powders. *Metal Power Report*, 2017, vol. 72, iss. 2, pp. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2017.01.004>
8. Vrancken B., Thijs L., Kruth J.-P., Humbeeck J. V. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 541, pp. 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.022>
9. Tillmann W., Schaak C., Nellesen J., Schaper M., Aydinöz M.E., Hoyer K.-P. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 13, pp. 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.11.006>
10. Hegab H. A. Design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys. *Manufacturing Review*, 2016, vol. 3, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2016010>
11. Singh S., Ramakrishna S., Singh R. Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, vol. 25, pp. 185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>

12. Heynick, M. Additive manufacturing of metals: a review. *Materials Science and Technology (MS&T) 2011 October 16–20, 2011, Columbus, Ohio*. Available at: <https://www.asminternational.org/documents/10192/23826899/cp2011mstp1413.pdf/04f142d0-f1ca-44d4-8a10-891992e5529a> (Accessed 19 October 2017).

13. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, no. 3, pp. 137–164. <https://doi.org/10.1179/1743280411y.0000000014>

14. Frazier W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>

Інфармацыя аб аўторе

Ільющэнка Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор, Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Alexil@mail.belpak.by

Information about an author

Alyaksandr Ph. Ilyuschanka – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Alexil@mail.belpak.by