

УДК 669.715

doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-79-88

Особенности процесса селективного лазерного плавления из конструкционной стали 28Х3СНМВФА

Д.С. Колчанов¹, А.А. Дренин¹, А.О. Денежкин¹,
Л.А. Шустова², С.Р. Сафиуллин³

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² АО «Научно-производственная корпорация «Конструкторское бюро машиностроения»

³ Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс»

Features of the Process of Selective Laser Melting from Structural Steel 28Cr3SiNiMoWV

D.S. Kolchanov¹, A.A. Drenin¹, A.O. Denezhkin¹,
L.A. Shustova², S.R. Safiullin³

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Design Bureau of Mechanical Engineering

³ IRE-Polyus

Селективное лазерное плавление — одна из наиболее востребованных технологий аддитивного производства, которая способна удовлетворить возрастающие потребности промышленности. Конструкционные высокопрочные стали всегда являлись востребованными для изготовления ответственных деталей, особенно в тяжелом и энергетическом машиностроении. Исследованы особенности процесса селективного лазерного плавления высокопрочной конструкционной стали 28Х3СНМВФА отечественного производства на аддитивном комплексе СЛП-250, разработанном в МГТУ им. Н. Э. Баумана совместно с ООО «МЦЛТ». Проведен входной контроль порошкового материала, включающий в себя гранулометрический, морфологический и химический анализ. Для определения оптимальных режимов и влияния основных технологических параметров на качество сплавления и наличие дефектов в выращенных образцах выполнен многофакторный эксперимент. Оценено влияние параметров процесса и термических циклов на основные дефекты селективного лазерного плавления: пористость и растрескивание. Пористость полученных образцов составила менее 0,2 %. Для получения бездефектной структуры и выращивания изделий из порошка стали 28Х3СНМВФА оптимизированы режимы выращивания.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, конструкционная сталь, порошковый материал

Selective laser melting is one of the most sought-after additive manufacturing technologies that can meet the growing needs of the industry. Structural high-strength steels have always been in demand for the manufacture of critical parts, especially in heavy and power engineering. The features of the process of selective laser melting of high-strength structural steel 28Cr3SiNiMoWV of domestic production are studied on the SLP-250 additive complex developed at the Bauman Moscow State Technical University together with MCLT LLC. The input control of the powder material was carried out, including granulometric, morphological and chemical analysis. To determine the optimal modes and the influence of the main technological parameters on the quality of fusion and the presence of defects in the grown samples, a multifactorial experiment was performed. The effect of process parame-

ters and thermal cycles on the main defects of selective laser melting, i.e., porosity and cracking, is estimated. The porosity of the samples obtained was less than 0.2%. To get a defect-free structure and to grow products from powdered steel 28Cr3SiNiMoWV, the growing modes are optimized.

Keywords: additive technologies, selective laser melting, structural steel, powder material

Современное отечественное тяжелое и энергетическое машиностроение постепенно осваивает и внедряет аддитивные технологии [1]. При этом существует потребность в изготовлении деталей сложной формы методом селективного лазерного плавления (СЛП) из конструкционных сталей [2, 3].

Одной из самых востребованных конструкционных сталей является марка 28Х3СНМВФА, которая хорошо зарекомендовала себя при изготовлении ответственных деталей [4–6]. Это связано с высокими механическими характеристиками стали, в частности с пределом прочности, составляющим 1500 МПа.

Высокопрочная конструкционная сталь 28Х3СНМВФА не имеет аналогов среди широкой номенклатуры зарубежных порошков для СЛП и практически не описана в мировой научной литературе [7].

Цель работы — изучение особенностей СЛП конструкционной стали 28Х3СНМВФА и оптимизация режимов выращивания для получения образцов с бездефектной структурой.

СЛП относится к аддитивным технологиям изготовления изделий из металлов. Процесс основан на послойном построении детали путем расплавления порошкового слоя лазерным излучением. Классическая компоновка установок для СЛП предусматривает наличие двух

бункеров для подачи порошкового материала и выращивания.

В начальный момент времени бункер с порошковым материалом приподнимается на определенную высоту, и устройство для его распыления наносит порошок на платформу выращивания. Таким образом, происходит формирование порошкового слоя. Затем по данным САД-модели осуществляется сканирование лазерным лучом порошкового слоя со сплавлением частиц порошка. После окончания сканирования слоя процесс повторяется до окончательного построения детали (рис. 1).

По окончании процесса излишки порошка удаляют специальным пылесосом, а модель извлекают из камеры, после чего могут подвергнуть дальнейшей термической обработке [8]. Чтобы исключить реакции окисления при плавлении порошка, установки для СЛП оснащают камерами с защитной атмосферой. В качестве защитного газа используют аргон.

После просеивания и просушивания не сплавленный порошок можно использовать повторно, добавив 30 % нового порошка, чтобы сохранить прогнозируемость получаемых свойств выращенной детали. Следует отметить, что по сравнению с тяжелыми металлами (например, Ti6Al4V) легкие сплавы, такие как AlSi10Mg и Inconel, более подвержены дефор-

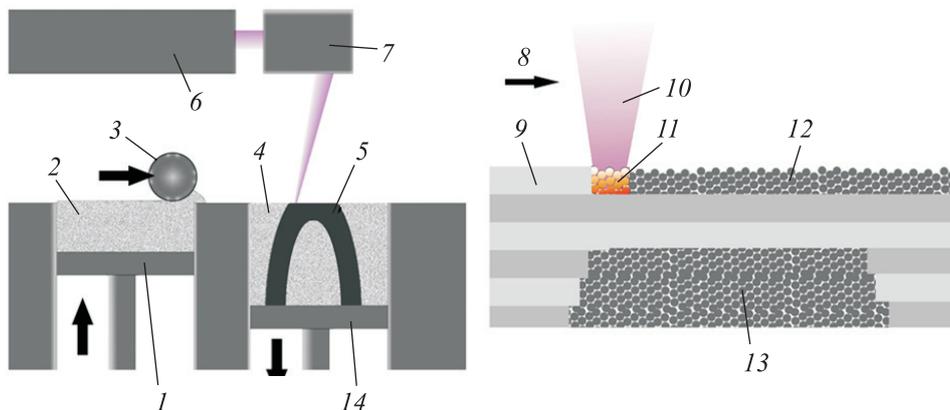


Рис. 1. Схема процесса СЛП:

1 — подложка бункера с порошком; 2 — бункер-питатель; 3 — ролик; 4 — порошок; 5 — выращиваемый объект; 6 — источник лазерного излучения; 7 — сканирующая система; 8 — направление сканирования; 9 — сплавленный порошок; 10 — лазерный луч; 11 — расплавленный порошок; 12 — слой порошка; 13 — необработанный порошок нижних слоев; 14 — подложка рабочей камеры

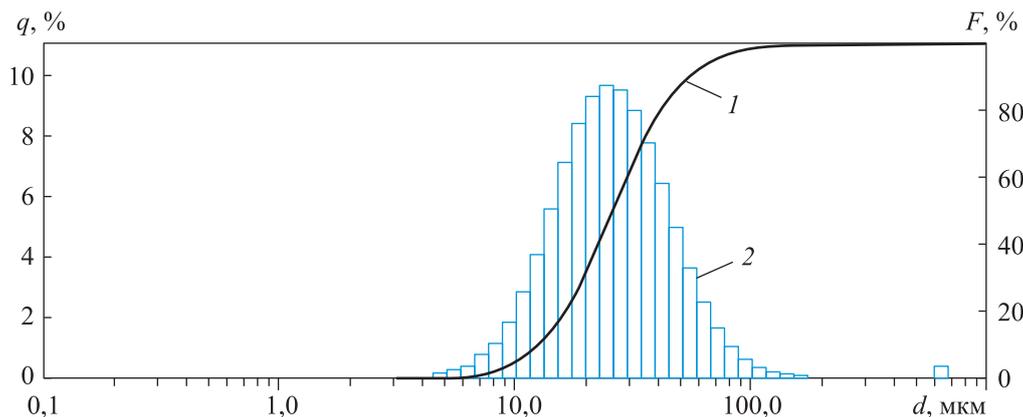


Рис. 2. Интегральное q (1) и дифференциальное F (2) распределения частиц порошка ПР-28ХЗСНМВФА по диаметру d

мации частиц порошка и требуют более тщательного просеивания [9].

Использование различных стратегий сканирования и подогрева подложки выращивания позволяет сгладить градиент температур, возникающий в процессе СЛП, и тем самым снизить термические напряжения [10, 11].

Материал и оборудование. Для исследования изготовлен отечественный порошок ПР-28ХЗСНМВФА с фракционным составом 10...40 мкм. Химический анализ порошка показал, что он имеет следующий состав, масс. %: Cr — 2,8...3,2; Ni — 0,8...1,2; Mo — 0,35...0,50; V — 0,05...0,15; W — 0,8...1,2; Mn — 0,5...0,8; Si — 0,8...1,2; C — 0,26...0,31; S < 0,01; P < 0,01; Fe — остальное.

Гранулометрический анализ порошка выполнен с помощью анализатора размера частиц HORIBA LA-350, использующего в качестве метода измерения лазерную дифракцию (теорию Ми). Результаты гранулометрического анализа порошка ПР-28ХЗСНМВФА в виде интегральной кривой распределения q и гистограммы дифференциального распределения F частиц порошка ПР-28ХЗСНМВФА по диаметру d приведены на рис. 2.

Установлено, что средний диаметр частиц порошка составляет 30,99 мкм. Полученное значение объясняется принципом работы анализатора размера частиц: пересчет рассеянного излучения происходит исходя из предположения, что все частицы имеют сферическую форму. По короткой стороне частиц размер попадает в диапазон 10...40 мкм, по длинной — иногда превышает 60 мкм, что вносит ошибку в результаты измерения анализатора.

Морфологический анализ порошка ПР-28ХЗСНМВФА проведен на металлургическом инвертированном микроскопе Olympus GX-51,

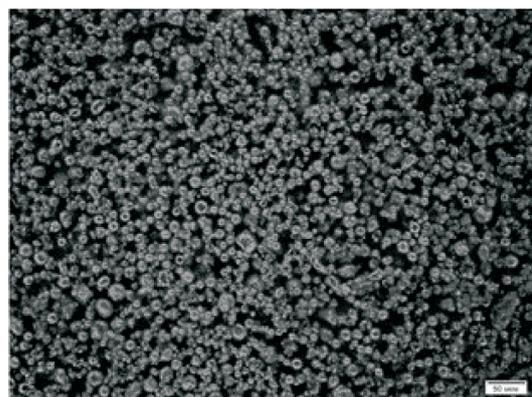


Рис. 3. Результаты морфологического анализа порошка ПР-28ХЗСНМВФА (увеличение $\times 50$ в темном поле)



Рис. 4. Внешний вид установки СЛП-250

оснащенном цифровой камерой Altra 20. Установлено, что в составе порошка имеются вытянутые несферические частицы, которые образуются при изготовлении и не поддаются сепарации от основной массы порошка имеющимися у производителя методами (рис. 3).

Исследование и выращивание образцов проведены на отечественной установке СЛП-250 (рис. 4), разработанной и изготовленной специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана и ООО «МЦЛТ». Комплекс представляет собой промышленную установку для процесса СЛП.

Техническая характеристика установки СЛП-250

Зона построения, мм:	
длина	250
ширина	250
высота	300
Тип лазера	Иттербиевый волоконный
Мощность лазера, Вт	400
Оптика	Подвижный телескоп (3D-сканатор)
Скорость построения, см ³ /ч	До 20 (в зависимости от материала и режима построения)
Диаметр лазерного луча в фокусе, мкм	80...200
Толщина слоя, мкм	20...100
Среднее потребление аргона, л/мин:	
в процессе выращивания	2
при очистке камеры	10
Метод очистки камеры	Предварительное вакуумирование
Габаритные размеры, мм:	
длина	2450
ширина	1550
высота	1930
Масса без порошка/с порошком, кг	1200/1500

Изготовление образцов. Для определения оптимальных режимов СЛП и влияния основных технологических параметров на качество сплавления и наличие дефектов в выращенных образцах выполнен многофакторный эксперимент. Варьируемыми параметрами являлись мощность лазерного излучения P , скорость сканирования лазерного луча по обрабатываемой поверхности v (далее скорость сканирования) и расстояние между центрами единичных дорожек расплава — шаг штриховки t .

Высота создаваемого слоя $h = 40$ мкм осталась неизменной величиной, что обеспечило оптимальное соотношение точности и производительности процесса выращивания. Для исследования изготовлены 36 образцов, режимы выращивания которых приведены в таблице.

Для изготовления опытных образцов использована многонаправленная стратегия сканирования лазерным излучением [12]. Она заключалась в том, что каждое сечение выращиваемой детали разбивали на элементарные квадратные ячейки в шахматном порядке. Отличие двух соседних ячеек выращивания состояло во взаимно перпендикулярной ориентации векторов сканирования. Размер ячейки составлял 4×4 мм.

Создание первого слоя (рис. 5, а) проводили в два этапа: сначала последовательно сканировали все ячейки с параллельными штрихами, затем — оставшиеся [13]. Формирование каждого следующего слоя (рис. 5, б) выполняли со смещением «шахматной сетки» по двум осям на величину, равную половине размера одной элементарной ячейки (2 мм), с поворотом на угол 67° против хода часовой стрелки.

Такая стратегия исключает возможность сканирования линий, которые расположены непосредственно поверх друг друга, и уменьшает содержание остаточных напряжений в готовом изделии, вследствие чего повышается точность геометрических характеристик и снижается шероховатость боковых поверхностей детали [14].

Перед выращиванием порошок прокаливали в печи при температуре 130°C в течение 30 мин с целью удаления адсорбированной влаги с поверхности частиц. СЛП проводили в защитной атмосфере аргона высокой чистоты (99,993). Диаметр пятна d_n оставался неизменным.

Результаты экспериментов были приведены к удельной энергии E , обобщающей основные параметры лазерной обработки (мощность лазерного излучения P , скорость сканирования v , высоту слоя h и диаметр пятна d_n), позволяя определить влияние варьирования шага штриховки на качество сплавления:

$$E = \frac{P}{vhd_n}$$

Такой способ обработки данных удобно использовать при сравнении результатов экспериментов, проведенных на разном оборудовании с различными параметрами, характерными для конкретной установки.

С ростом скорости сканирования, оказывающей наибольшее влияние на производительность процесса выращивания, удельная энергия падает. Уменьшение мощности лазерного излучения при неизменных значениях скорости

Режимы выращивания при высоте слоя $h = 40$ мкм

Номер образца	P , Вт	v , мм/с	t , мкм	Номер образца	P , Вт	v , мм/с	t , мкм
1	165	850,0	92	19	220	850,0	92
2	165	850,0	115	20	220	850,0	115
3	165	850,0	138	21	220	850,0	138
4	165	722,5	92	22	220	722,5	92
5	165	722,5	115	23	220	722,5	115
6	165	722,5	138	24	220	722,5	138
7	165	1062,6	92	25	220	1062,6	92
8	165	1062,6	115	26	220	1062,6	115
9	165	1062,6	138	27	220	1062,6	138
10	180	850,0	92	28	250	850,0	92
11	180	850,0	115	29	250	850,0	115
12	180	850,0	138	30	250	850,0	138
13	180	722,5	92	31	250	722,5	92
14	180	722,5	115	32	250	722,5	115
15	180	722,5	138	33	250	722,5	138
16	180	1062,6	92	34	250	1062,6	92
17	180	1062,6	115	35	250	1062,6	115
18	180	1062,6	138	36	250	1062,6	138

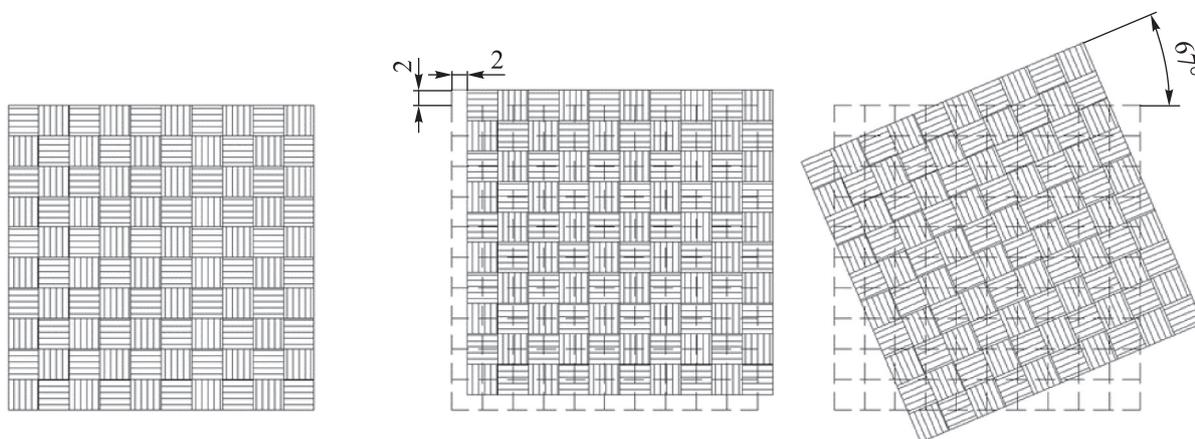


Рис. 5. Схемы выращивания первого (а) и каждого следующего (б) слоев с помощью многонаправленной стратегии сканирования

сканирования и диаметра пятна в фокусе снижает удельную энергию, что приводит к недостаточному плавлению частиц материала и увеличению пористости, а также к значительному влиянию сил конвекции Марангони [15].

Далее выращенные кубические образцы снимали с подложки выращивания для подготовки шлифов и проведения металлографических исследований.

Исследование образцов. Для визуального исследования полученных образцов использовали оптический микроскоп Olympus SZ61. Следует отметить, что форма всех образцов выдерживалась при всех режимах обработки согласно САД-модели. В некоторых образцах обнаружены дефекты в виде пор и трещин (рис. 6).

Как видно из рис. 6, поры в основном имеют неправильную форму, что свидетельствует

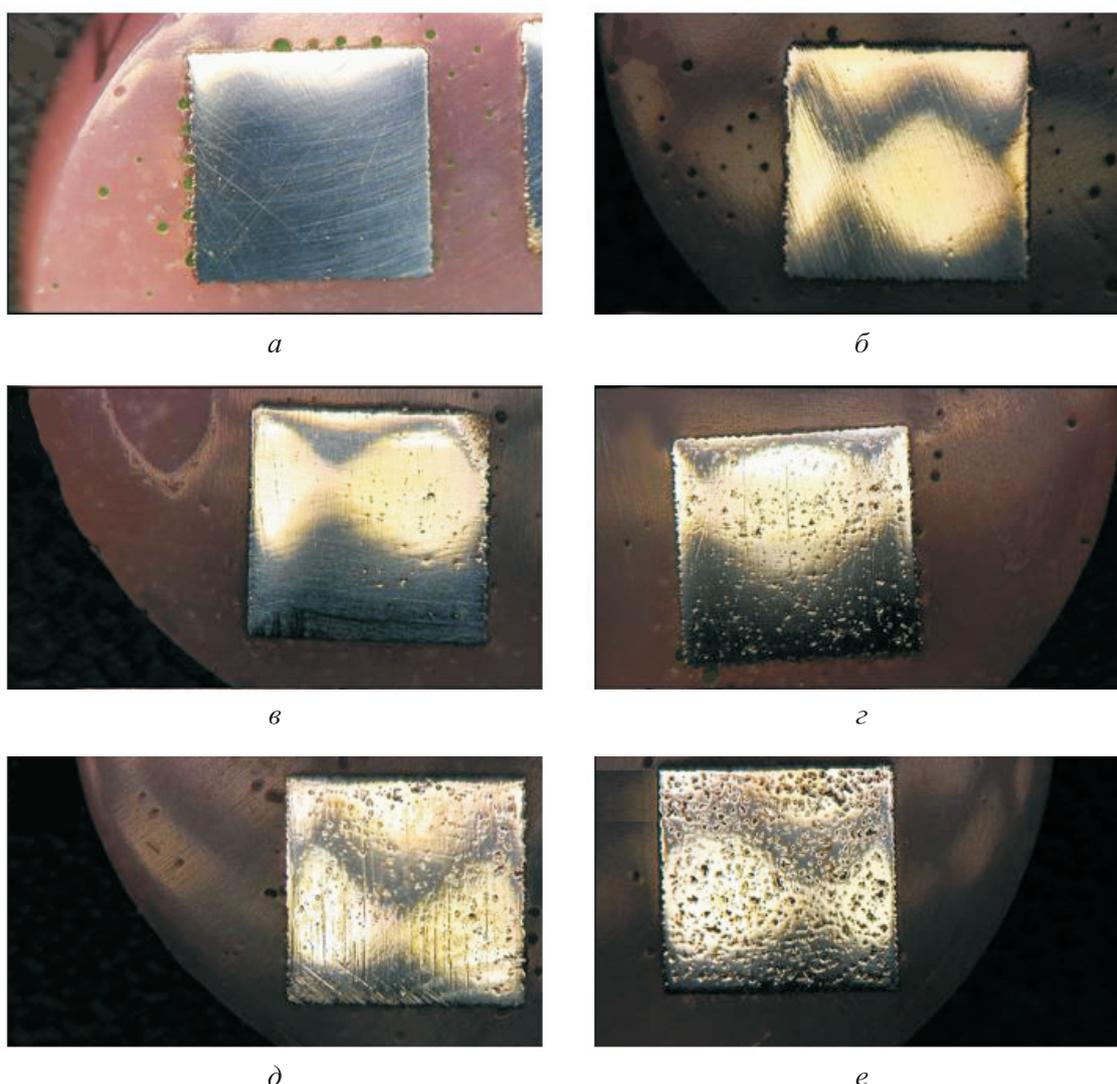


Рис. 6. Внешний вид шлифов поперечных сечений образцов № 31 (а), 29 (б), 35 (в), 21 (г), 3 (д) и 8 (е)

о недостаточности вводимой энергии для полного расплавления порошкового материала. Количество и расположение пор связаны с режимами выращивания (см. таблицу).

Также оценивали среднюю пористость по всему образцу и ее максимальное значение по результатам измерения в девяти зонах. Зависимости пористости исследованных образцов от удельной энергии при различных значениях шага штриховки приведены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, уменьшение шага штриховки положительно сказывается на снижении пористости при одних и тех же значениях скорости сканирования и мощности лазерного излучения. При шаге штриховки $t = 138$ и 115 мкм порошок между сплавленными дорожками оставался нерасплавленным, что приводило к образованию пор.

Увеличение шага штриховки можно компенсировать повышением мощности лазерного излучения и снижением скорости сканирования. Ванна расплава становится шире и возрастает время ее нахождения в жидком состоянии, что способствует снижению пористости. В то же время чрезмерно высокая мощность лазерного излучения и низкая скорость сканирования приводят к эффекту испарения.

Анализ результатов исследования показал, что при низкой удельной энергии пористость больше, чем при высокой, так как ее недостаточно для переплавления объема порошкового слоя. Увеличение мощности лазерного излучения, уменьшение скорости сканирования и шага штриховки вызывают рост удельной энергии и, как следствие, снижение пористости. Однако большая удельная энергия приводит к возник-

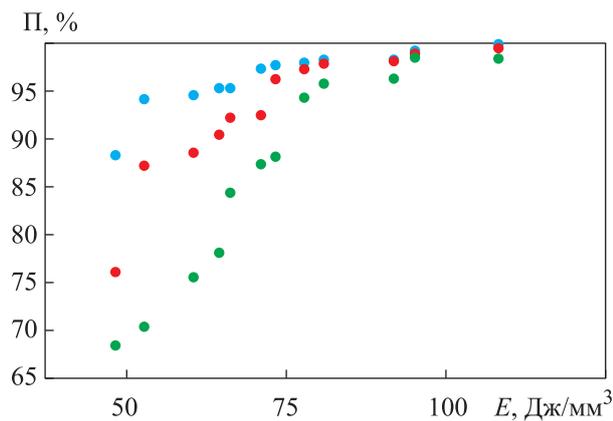
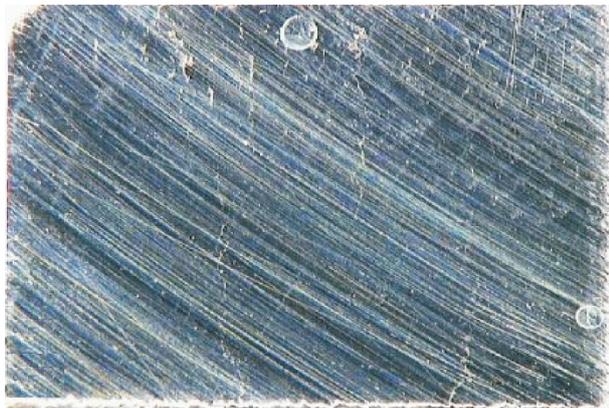


Рис. 7. Зависимости пористости образцов П от удельной энергии E при шаге штриховки $t = 92$ (●), 115 (●) и 138 мкм (●)



а



б

Рис. 8. Микроструктура образцов № 27 (а) и 31 (б) с горизонтальными трещинами

новению трещин. Других пор, связанных с отклонением размеров порошинок от заданных значений не наблюдалось.

В исследованных образцах преобладают горизонтальные трещины, т. е. расслоение материала (рис. 8). Появление трещин связано

с особенностями технологических свойств материала. Как правило, трещины возникают из-за исчерпания запаса пластичности при деформировании в высокотемпературной области (рис. 8, а).

Однако могут образовываться трещины другой природы (рис. 8, б). Поэтому исследование технологической прочности порошковых материалов при выращивании объектов является важной задачей. Можно установить такие интервалы параметров режимов, в которых их образование маловероятно, либо снизить скорость охлаждения, приводящую к закалке и охрупчиванию материала, подогревом платформы выращивания [15].

На основании результатов исследований изготовлен образец при следующих параметрах выращивания: мощность лазерного излучения $P = 250$ Вт, скорость сканирования $v = 722,5$ мм/с, шаг штриховки $t = 92$ мкм, высота слоя $h = 40$ мкм. Указанное сочетание параметров обеспечивает получение требуемых геометрических характеристик при их изготовлении образцов для механических испытаний согласно ГОСТ 1497–84 [16]. Таким образом, достигнуто оптимальное соотношение производительности и пористости при отсутствии трещин и несплавлений.

Микроструктура поперечного сечения образца, полученная через слой спирта на микроскопе Olympus SZ61, показана на рис. 9. В образце наблюдаются дефекты в виде микропор (объемная доля пор составляет менее 0,2 %). Других крупных дефектов не обнаружено. На поперечном сечении образца хорошо видна мелкодисперсная структура зерен, что обеспе-

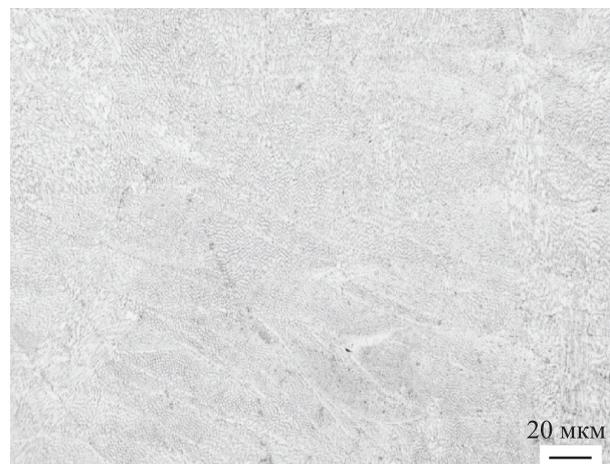


Рис. 9. Микроструктура поперечного сечения образца с микропорами (при увеличении $\times 6,7$)

чивает ему высокие механические характеристики.

Выводы

1. Впервые на отечественном оборудовании СЛП-250 отработан и реализован процесс выращивания изделий из порошка конструкционной стали 28Х3СНМВФА.

2. Исследованы свойства порошка для оценки его применимости в технологии СЛП. Общая картина морфологии частиц позволяет заключить, что незначительные отклонения от размеров и сферичности не является критичными.

3. Отработаны режимы выращивания, изготовлены и исследованы образцы. Установлено, что сталь 28Х3СНМВФА подходит для СЛП. В ряде режимов образуются поры и трещины. Определен оптимальный режим с отсутствием указанных дефектов.

4. Показано, что СЛП имеет дальнейшую перспективу развития в области тяжелого и энергетического машиностроения для изготовления изделий из высокопрочных конструкционных сталей и для активного внедрения такой технологии в производственные процессы отечественной промышленности.

Литература

- [1] Гречухин А.Н., Бычкова Н.А. Перспективы применения аддитивных технологий на предприятиях Курской области. *Реальность — сумма информационных технологий. Сб. науч. ст. межд. молодеж. науч.-практ. конф.* Курск, ЮЗГУ, 2016, с. 87–89.
- [2] Майоров В.А., Свиридов А.С., Лопатина Ю.А. Технология сборки базовых модулей ТФЭ на основе применения аддитивных технологий. *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*, 2020, т. 67, № 4, с. 44–50, doi: <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-4-44-50>
- [3] Begendikova Z.A., Bukaeva A.Z. Application of additive technologies in modern foundry production. *Вестник КазАТК*, 2021, № 2, с. 20–27, doi: <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2021-117-2-20-27>
- [4] Никуйко С.А. Разработка активной фазированной антенной решетки современных РЛС с применением технологии воздушного охлаждения на базе аддитивных технологий. *Гагаринские чтения. Сб. тез. док. XLV межд. молодеж. науч. конф.* Москва, МАИ, 2019, с. 497–498.
- [5] Никульшин П.А., Дорохов В.С., Овсиенко О.Л. и др. Разработка перспективных материалов защитного слоя для каталитических реакторов с применением компьютерного моделирования и аддитивных технологий. *Нефтехимия*, 2021, т. 61, № 6, с. 796–807, doi: <https://doi.org/10.31857/S0028242121060058>
- [6] Филиппов М.А., Власов А.И., Садаков Н.А. Опыт применения аддитивных технологий при производстве сложных корпусных деталей. *Электроника и электрооборудование транспорта*, 2020, № 4, с. 37–40.
- [7] Li N., Huang S., Zhang G. et al. Progress in additive manufacturing on new materials: a review. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, no. 2, pp. 242–269, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
- [8] Kusuma C. *The effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of pure titanium and Ti-6Al-4V alloy for selective laser melting.* Master Sci. Mech. Eng. Thesis. Wright State University, 2016. 128 p.
- [9] Cordova L., Campos M., Tinga T. Revealing the effects of powder reuse for selective laser melting by powder characterization. *JOM*, 2019, vol. 71, no. 3, pp. 1062–1072, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3305-2>
- [10] Jia H., Sun H., Wang H. et al. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 113, no. 9–10, pp. 2413–2435, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06810-3>
- [11] Mohanty S., Tutum C.C., Hattel J.H. Cellular scanning strategy for selective laser melting: evolution of optimal grid-based scanning path and parametric approach to thermal homogeneity. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8608, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2004256>
- [12] Gu D., Guo M., Zhang H. et al. Effects of laser scanning strategies on selective laser melting of pure tungsten. *Int. J. Extreme Manuf.*, 2020, vol. 2, no. 2, art. 025001, doi: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab7b00>

- [13] Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. и др. Исследование влияния режимов выращивания методом селективного лазерного плавления на пористость в изделиях из медных сплавов. *Фотоника*, 2019, т. 13, № 2, с. 160–171, doi: <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.2.160.168>
- [14] Kamarudin K., Wahab M.S., Shayfull Z. et al. Dimensional accuracy and surface roughness analysis for AlSi10Mg produced by selective laser melting (SLM). *MATEC Web Conf.*, 2016, vol. 78, art. 01077, doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/20167801077>
- [15] Le T.N., Lo Y.L. Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on melt-pool formation in transition mode of selective laser melting process. *Mater. Des.*, 2019, vol. 179, art. 107866, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107866>
- [16] ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Москва, Стандартинформ, 2008. 24 с.

References

- [1] Grechukhin A.N., Bychkova N.A. [Prospects of using additive technology in Kursk region enterprises]. *Real'nost' — summa informatsionnykh tekhnologiy. Sb. nauch. st. mezhd. molodezh. nauch.-prakt. konf.* [Reality – is a Sum of Information Technologies. Proc. Int. Youth Sci.-Pract. Conf.]. Kursk, YuZGU Publ., 2016, pp. 87–89. (In Russ.).
- [2] Mayorov V.A., Sviridov A.S., Lopatina Yu.A. Assembly technology of PVT-modules based on 3D-technologies. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK* [Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture], 2020, vol. 67, no. 4, pp. 44–50, doi: <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-4-44-50> (in Russ.).
- [3] Begendikova Z.A., Bukaeva A.Z. Application of additive technologies in modern foundry production. *Vestnik KazATK* [The Bulletin of KazATC], 2021, no. 2, pp. 20–27, doi: <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2021-117-2-20-27> (in Russ.).
- [4] Nikuyko S.A. [Design of active phased array antenna for modern radar systems using additive technologies]. *Gagarinskie chteniya. Sb. tez. dok. XLV mezhd. molodezh. nauch. konf.* [Gagarin Readings. Proc. XLV Int. Youth Sci. Conf.]. Moscow, MAI Publ., 2019, pp. 497–498. (In Russ.).
- [5] Nikul'shin P.A., Dorokhov V.S., Ovsienko O.L. et al. Development of advanced materials for protective layer of catalytic reactor using computer modeling and additive technologies. *Neftekhimiya*, 2021, vol. 61, no. 6, pp. 796–807, doi: <https://doi.org/10.31857/S0028242121060058> (in Russ.).
- [6] Filippov M.A., Vlasov A.I., Sadakov N.A. Experience with utilizing of additive technologies for complex housing parts production. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2020, no. 4, pp. 37–40. (In Russ.).
- [7] Li N., Huang S., Zhang G. et al. Progress in additive manufacturing on new materials: a review. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2019, vol. 35, no. 2, pp. 242–269, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.002>
- [8] Kusuma C. *The effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of pure titanium and Ti-6Al-4V alloy for selective laser melting*. Master Sci. Mech. Eng. Thesis. Wright State University, 2016. 128 p.
- [9] Cordova L., Campos M., Tinga T. Revealing the effects of powder reuse for selective laser melting by powder characterization. *JOM*, 2019, vol. 71, no. 3, pp. 1062–1072, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3305-2>
- [10] Jia H., Sun H., Wang H. et al. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 113, no. 9–10, pp. 2413–2435, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06810-3>
- [11] Mohanty S., Tutum C.C., Hattel J.H. Cellular scanning strategy for selective laser melting: evolution of optimal grid-based scanning path and parametric approach to thermal homogeneity. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8608, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2004256>
- [12] Gu D., Guo M., Zhang H. et al. Effects of laser scanning strategies on selective laser melting of pure tungsten. *Int. J. Extreme Manuf.*, 2020, vol. 2, no. 2, art. 025001, doi: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab7b00>
- [13] Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O. et al. Study of the effect of growing modes by selective laser melting method on porosity in copper alloy products. *Fotonika* [Photonics

- Russia], 2019, vol. 13, no. 2, pp. 160–171, doi: <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.2.160.168>
- [14] Kamarudin K., Wahab M.S., Shayfull Z. et al. Dimensional accuracy and surface roughness analysis for AlSi10Mg produced by selective laser melting (SLM). *MATEC Web Conf.*, 2016, vol. 78, art. 01077, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167801077>
- [15] Le T.N., Lo Y.L. Effects of sulfur concentration and Marangoni convection on melt-pool formation in transition mode of selective laser melting process. *Mater. Des.*, 2019, vol. 179, art. 107866, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107866>
- [16] GOST 1497–84. *Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [State standard GOST 1497–84. Metals. Methods of tension test]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 24 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 30.03.2022

Информация об авторах

КОЛЧАНОВ Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: kolchanovdmitry@gmail.com).

ДРЕНИН Алексей Анатольевич — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: drenin@inbox.ru).

ДЕНЕЖКИН Антон Олегович — аспирант, кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: denezhkin@bmstu.ru).

ШУСТОВА Людмила Александровна — инженер. АО «Научно-производственная корпорация «Конструкторское бюро машиностроения» (140402, Коломна, Российская Федерация, Окский проспект, д. 42, e-mail: shustova2711@mail.ru).

САФИУЛЛИН Саловат Ратмирович — инженер-технолог. Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс» (141195, Фрязино, Российская Федерация, ул. Площадь Введенского, д. 3, стр. 5, e-mail: safiullinsr@bmstu.student.ru).

Information about the authors

KOLCHANOV Dmitry Sergeevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Laser Technologies in Mechanical Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kolchanovdmitry@gmail.com).

DRENIN Aleksey Anatolyevich — Candidate of Science (Eng.), Senior Lecturer, Laser Technologies in Mechanical Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: drenin@inbox.ru).

DENEZHKIN Anton Olegovich — Postgraduate, Laser Technologies in Mechanical Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: denezhkin@bmstu.ru).

SHUSTOVA Lyudmila Alexandrovna — Engineer. Scientific and Production Corporation. Design Bureau of Mechanical Engineering (140402, Kolomna, Russian Federation, Oksky Prospekt, Bldg. 42, e-mail: shustova2711@mail.ru).

SAFIULLIN Salovat Ratmirovich — Process Engineer. Scientific and Technical Association. IRE-Polyus (141195, Fryazino, Russian Federation, Ploshchad Vvedenskogo St., 3, Bldg. 5, e-mail: safiullinsr@bmstu.student.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О., Шустова Л.А., Сафиуллин С.Р. Особенности процесса селективного лазерного плавления из конструкционной стали 28X3СНМВФА. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 10, с. 79–88, doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-79-88

Please cite this article in English as:

Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O., Shustova L.A., Safiullin S.R. Features of the Process of Selective Laser Melting from Structural Steel 28Cr3SiNiMoWV. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 10, pp. 79–88, doi: 10.18698/0536-1044-2022-10-97-88