

Оригинальная статья

УДК 669-1

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-92-101

ВЛИЯНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПЕРЕПЛАВОМ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ СЛОЕВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 15X25T

© 2025 г. А. П. Адылина, В. В. Овчинников, Т. М. Хунг, И. С. Кушнир

Московский политехнический университет (Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, 38)

Аннотация. Исследования технологического процесса селективного лазерного плавления (СЛП) показало значительное повышение качества синтезируемых объектов. При неправильном подборе технологических режимов при производстве изделий из жаропрочной стали могут возникнуть различные дефекты (поры, трещины, непроплавы), которые существенно снижают механические свойства материала. Устранение дефектов при селективном лазерном плавлении может быть достигнуто за счет оптимизации режима обработки лазерным лучом. В качестве такой стратегии обработки предложен повторный переплав сформированного валика или его термическая обработка лазерным излучением без расплавления металла при повторном проходе лазера без подачи порошка. Исследования влияния повторного лазерного переплава закристаллизовавшихся треков на микроструктуру и механические свойства деталей, изготовленных из порошков коррозионностойких и жаропрочных сталей, в настоящее время актуальны. Представлены исследования влияния режимов выращивания образцов жаропрочной стали марки 15X25T на структуру и механические свойства. Исследованы механические свойства, жаростойкость и коррозионная стойкость образцов стали марки 15X25T, полученных СЛП с дополнительным переплавом ранее перекристаллизованных треков. Показано, что полученный материал превосходит по комплексу механических свойств деформированный полуфабрикат из стали марки 15X25T. В образцах выявлены значительные остаточные напряжения (примерно 236 МПа). Использование дополнительного переплава позволяет понизить этот уровень до 108 МПа. Результаты микроструктурного анализа поверхностного слоя образцов стали марки 15X25T, полученных СЛП с дополнительным лазерным переплавом перекристаллизованных треков (мощность лазера 135 Вт и скорость сканирования 450 мм/с), выявили снижение шероховатости поверхности образца с 62 до 12 – 15 мкм.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, аддитивные технологии, жаропрочные стали, пористость, шероховатость, повторный переплав, механические свойства, остаточные напряжения

Для цитирования: Адылина А.П., Овчинников В.В., Хунг Т.М., Кушнир И.С. Влияние селективного лазерного плавления с дополнительным переплавом перекристаллизованных слоев на структуру и свойства жаропрочной стали 15X25T. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):92–101. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-92-101](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-92-101)

Original article

INFLUENCE OF SELECTIVE LASER MELTING WITH ADDITIONAL REMELTING OF RECRISTALLISED LAYERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT STEEL 15X25T

© 2025 A. P. Adilina, V. V. Ovchinnikov, T. M. Hung, I. S. Kushnir

Moscow Polytechnic University (38 Big. Semenovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation)

Abstract. Research into the selective laser melting (SLM) process has led to a significant improvement in the quality of synthesized objects. With incorrect selection of process modes during the production of heat-resistant steel products, various defects (pores, cracks, lack of fusion) may occur, which significantly reduce the mechanical properties of the material. Elimination of defects in selective laser melting can be achieved by optimizing the

laser beam processing mode. As such a processing strategy, it is proposed to re-melt the formed roller or heat-treat it with laser radiation without melting the metal during a second laser pass without powder feed. The study of the influence of repeated laser remelting of crystallized tracks on the microstructure and mechanical properties of parts made from powders of corrosion-resistant and heat-resistant steels is currently relevant. This article presents studies of the influence of growth modes of heat-resistant steel 15X25T samples on the structure and mechanical properties. The mechanical properties, heat resistance and corrosion resistance of 15Kh25T steel samples obtained by SLM with additional remelting of previously recrystallized tracks were investigated. It was shown that the obtained material surpasses the deformed semi-finished product made of 15Kh25T steel in a set of mechanical properties. Significant residual stresses at a level of 236 MPa were revealed in 15Kh25T steel samples. The use of additional remelting allows this level to be reduced to 108 MPa. The results of microstructural analysis of the surface layer of 15X25T steel samples obtained by SLM with additional laser remelting of recrystallized tracks (laser power 135 W and scanning speed 450 mm/s) revealed a decrease in the surface roughness of the sample R_z from 62 to 12 – 15 μm .

Keywords: selective laser melting, additive manufacturing, heat-resistant steels, porosity, roughness, remelting, mechanical properties, residual stresses

For citation: Adylina A.P., Ovchinnikov V.V., Hung T.M., Kushnir I.S. Influence of selective laser melting with additional remelting of recrystallized layers on the structure and properties of heat-resistant steel 15X25T. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):92–101. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-92-101](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-92-101)

Введение

Селективное лазерное плавление (СЛП) – это метод 3D-печати сложнопрофильных металлических изделий. Этот метод основан на выращивании микрослоев порошкового материала высокоэнергетическим лазерным излучением для послойного синтеза объекта по заданной программе.

Исследования технологического процесса селективного лазерного плавления (СЛП) привели к значительному повышению качества синтезируемых объектов, обусловленных снижением пористости до менее 1 %, уменьшению шероховатости поверхности изделий и утончению толщины стенок деталей до 300 мкм.

При неправильном подборе технологических режимов при производстве изделий из жаропрочной стали могут возникнуть различные дефекты (поры, трещины, непроплавы), которые существенно снижают механические свойства материала.

При быстром затвердевании расплава и попадании в него инертного газа внутри синтезированного изделия могут образовываться поры. Дефекты (непроплава) обычно возникают из-за недостаточной мощности лазера, что приводит к неполной глубине плавления и образованию пустот между слоями. Для устранения этого дефекта можно снизить толщину насыпного слоя порошка.

Термическое растрескивание (растрескивание при затвердевании) представляет собой процесс, который часто наблюдается на последних этапах быстрого охлаждения расплавленного металла. Такая структура обладает очень низкой прочностью.

Следует отметить, что детали, полученные методом селективного лазерного плавления, имеют высокую шероховатость поверхности, что снижает эксплуатационные свойства при работе в сборке.

Устранение пористости, трещин и снижение уровня остаточных напряжений при селективном лазерном плавлении может быть достигнуто за счет оптимизации режима обработки лазерным лучом. В качестве такой стратегии обработки предложен повторный переплав сформированного валика или его термическая обработка лазерным излучением без расплавления металла при повторном проходе лазера без подачи порошка.

Исследование влияния повторного лазерного переплава закристаллизовавшихся треков на микроструктуру и механические свойства деталей, изготовленных из порошков коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, в настоящее время актуальны.

Методы и принципы исследования

В исследовании были использованы порошки, полученные распылением аргоном расплава стали марки 15X25T. Для создания экспериментальных образцов была использована установка Concept Laser M2 от компании Concept Laser GmbH (Германия).

Для исследования использовали различные методики: растровая электронная микроскопия (РЭМ), компьютерная микротомография, дюротрия, микродюротрия, измерения механических свойств для более точного анализа материалов. Для изучения микроструктуры приме-

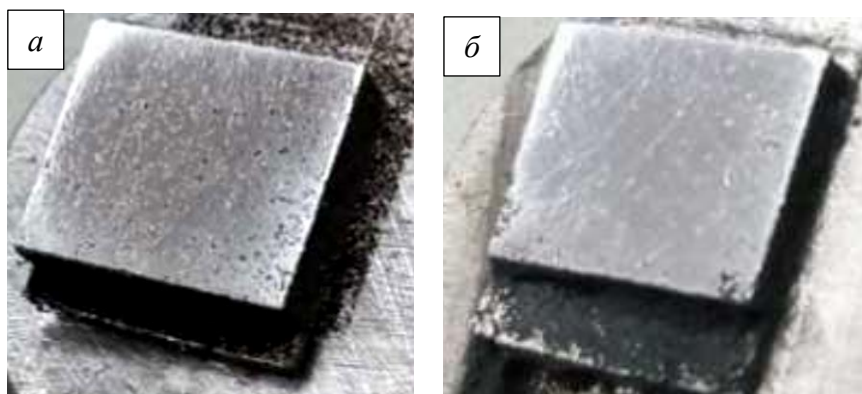


Рис. 1. Внешний вид образцов СЛП, синтезированных без (а) и с дополнительным переплавом (б) ранее перекристаллизованных треков стали марки 15Х25Т

Fig. 1. External appearance of SLM samples synthesized without (a) and with additional remelting (b) of previously recrystallized tracks of 15X25T steel

нялся оптический абберационный микроскоп Axio Observer Z1m.

Для проведения механических испытаний использовали универсальную сервогидравлическую систему Instron 8801 Dynacell (США).

Основные результаты

В процессе синтеза из частиц порошка стали марки 15Х25Т параметры сканирования лазера были настроены так, чтобы толщина слоя порошка составляла 30 мкм. В ходе исследований мощность лазера была установлена на уровне 180 Вт, параметры сканирования лазера варьировали в пределах от 500 до 800 мм/с. Эти интервалы были подобраны с целью предотвращения испарения или недостаточного плавления частиц порошка. Изготовлены образцы кубической формы со сторонами 10 мм, состоящие из 15 – 20 слоев.

В результате экспериментов было установлено, что сканирование порошковых образцов из стали марки 15Х25Т со скоростью в диапазоне от 350 до 450 мм/с приводит к короблению поверхности и появлению трещин из-за возникновения высоких термических напряжений. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, опубликованными в работах [1; 2].

Для оценки влияния дополнительного переплава на структуру и свойства образцов стали марки 15Х25Т были синтезированы образцы с дополнительным переплавом ранее сформированных валиков при мощности лазера 150 Вт и скорости сканирования 400 мм/с. На рис. 1 приведен внешний вид образцов, синтезированных без и с дополнительным переплавом ранее перекристаллизованных слоев.

Исследование оптических изображений, полученных со шлифованных поверхностей образцов, показали, что при увеличении скорости

сканирования достигается минимальная объемная пористость, которая уменьшается нелинейно при использовании указанных режимов. Минимальное значение этого параметра достигается при скорости сканирования 450 мм/с. Однако, следует отметить, что при увеличении скорости сканирования выше 750 мм/с на оптических изображениях шлифов поверхности полученных образцов появляются заметные артефакты в виде «непроплавов».

Использование дополнительного переплава ранее перекристаллизованных треков приводит к снижению объемной пористости во всем диапазоне скоростей сканирования. При увеличении скорости сканирования в диапазоне от 450 до 600 мм/с наблюдается уменьшение областей с дефектами в структуре (рис. 2). Это может быть обусловлено уменьшением удельной тепловой энергии при повышении скорости сканирования, что ведет к частичной переплавке порошка.

При изготовлении деталей по технологии СЛП возникают остаточные напряжения, которые могут ограничивать практическое применение этой технологии из-за деформации деталей или образования микротрещин. Большие остаточные напряжения могут негативно сказываться на механических свойствах изготовленных деталей. Дополнительный переплав ранее закристаллизовавшихся валиков способствует снижению уровня остаточных напряжений и деформаций.

В процессе нагрева остаточные напряжения могут быть уменьшены двумя способами [3]. Во-первых, путем пластической деформации, когда они превышают предел текучести материала. При превышении предела текучести материала происходит активация большого количества дислокаций, которые начинают перемещаться, вызывая быструю пластическую деформацию. Исследования показывают, что степень снижения остаточных напряжений через этот механизм

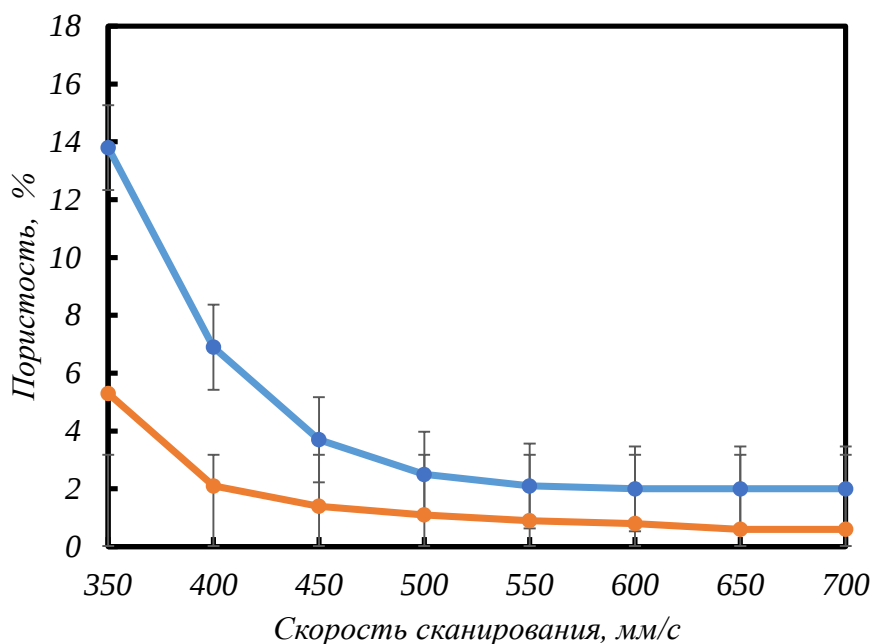


Рис. 2. Влияние скорости сканирования на пористость объемных образцов стали марки 15X25T при СЛП без (1) и с дополнительным переплавом перекристаллизованных треков (2)

Fig. 2. Effect of scanning speed on the porosity of bulk samples of 15X25T steel, during SLM without (1) and with additional remelting of recrystallized tracks (2)

зависит от температуры нагрева, а не от его продолжительности.

При напряжениях ниже предела текучести материала происходит явление ползучести. В этих условиях при определенных температурах ползучесть становится основным механизмом снижения напряжений.

В табл. 1 приведены значения остаточных напряжений, определенные в образцах стали марки 15X25T, выращенных с применением и без применения дополнительного переплава сформированных ранее валиков.

Применение дополнительного переплава ранее закристаллизовавшихся валиков при мощности

лазера 0,7 – 0,8 от мощности при синтезе образцов способствует снижению остаточных напряжений примерно в 2 раза (табл. 1).

Дополнительный переплав ранее перекристаллизованных треков способствует уменьшению шероховатости боковой поверхности образцов кубической формы из стали марки 15X25T. Так шероховатость R_z образцов, синтезированных при режиме сканирования 750 мм/с при мощности P излучения 180 Вт, составила 62 мкм. Повторный переплав ранее сформированных валиков при мощности излучения 135 Вт при скорости сканирования 450 мм/с позволил сократить величину R_z до 12 – 15 мкм.

Т а б л и ц а 1

Остаточные напряжения в синтезированных образцах стали марки 15X25T

Table 1. Residual stresses in synthesized samples of 15X25T steel

Вариант выращивания образцов	Изменение диаметра d_1 кольцевого образца после разреза, мм	Уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, МПа
СЛП без дополнительного переплава	+0,25	236
СЛП с использованием дополнительного переплава перекристаллизованных треков	–0,20	108

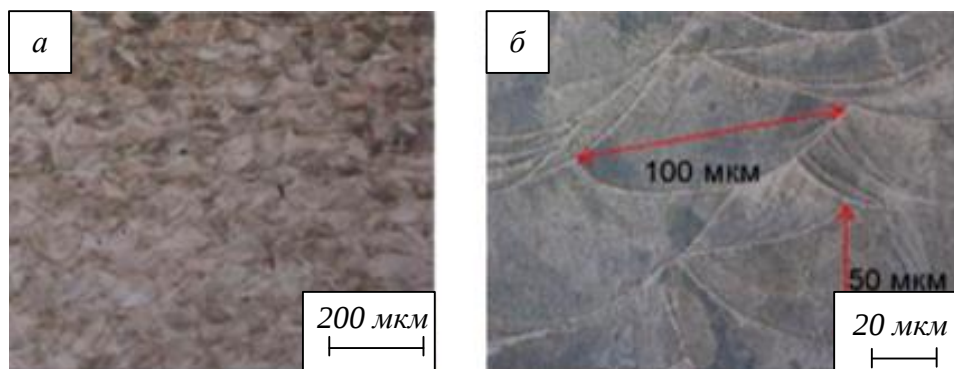


Рис. 3. Микроструктура стали марки 15X25T, полученной методом СЛП без дополнительного переплава
Fig. 3. Microstructure of 15X25T steel obtained by the SLM method without additional remelting

На микрофотографиях представлены продольные и поперечные сечения образца стали, на которых отчетливо видны отдельные зерна. Средний размер последних составляет около 95 мкм в плоскости XY и примерно 45 мкм в плоскости XZ (рис. 3). Ванны с расплавом различных размеров имеют поперечное сечение в виде дугообразных сегментов, которые формируют слоистую структуру образца.

В продольном сечении ванны с расплавленным материалом представлены эллиптическими треками, которые организованы в двух взаимно перпендикулярных направлениях, повторяющих путь лазера. Ванны с расплавом обладают неод-

нородной структурой, разделенной на мелкие ячейки кристаллизации.

Цилиндрический образец стали марки 15X25T в плоскостях XZ и XY , подвергнутый дополнительному переплаву ранее перекристаллизованных треков, имеет характерную микроструктуру, напоминающую чешуйки размером около 0,1 мм (рис. 4).

Структура СЛП образца стали марки 15X25T напоминает многопроходный сварной шов в поперечном сечении. Образование подобной структуры, имеющей дендритную форму, является результатом относительно медленного охлаждения расплавленного металла. В ходе

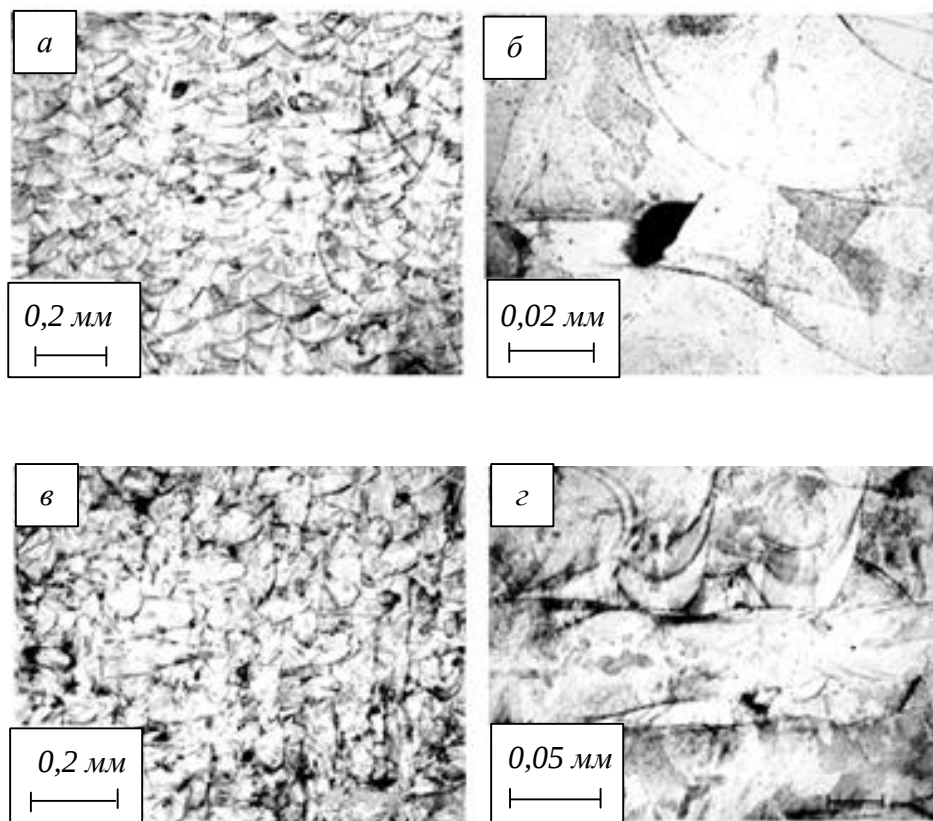


Рис. 4. Микроструктура кубического образца из стали марки 15X25T (ориентированы вдоль осей XZ (в, г) и XY (а, б))
Fig. 4. Microstructure of a cubic sample made of 15X25T steel (are oriented along the XZ (в, г) and XY (а, б) axes)

Механические свойства образцов стали марки 15X25T при нормальной температуре**Table 2. Mechanical properties of 15X25T steel samples at normal temperature**

Образец	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %
СЛП без дополнительного переплава треков	440	18	40
СЛП с дополнительным переплавом треков	455	22	45
Компактный материал после отжига 730 – 770 °С	445	20	45

исследования стали марки 15X25T с использованием крупных увеличений было обнаружено (рис. 4, б), что структура чешуек является неоднородной и состоит из фрагментов, имеющих различную кристаллическую ориентацию.

В рамках проводимых исследований были получены результаты сравнительных механических испытаний образцов стали марки 15X25T, полученных по традиционной технологии прокатки и методом СЛП из порошка без и с дополнительным переплавом треков. Для сравнительных испытаний использовали образцы из прутков стали марки 15X25T после отжига 730 – 770°С с охлаждением на воздухе. В табл. 2 приведены сравнительные данные по механическим свойствам образцов при нормальной температуре.

В табл. 3 представлена сравнительная информация о механических свойствах образцов при нормальной и повышенной температуре. Механические характеристики образцов СЛП и прутков стали марки 15X25T, полученных по традиционной технологии, схожи. При этом для СЛП образцов, синтезированных с дополнительным переплавом перекристаллизованных треков, отмечается рост прочностных и пластических свойств.

Результаты испытаний на жаростойкость представлены в табл. 4. Показатель жаропроч-

ности у образцов, выращенные СЛП, превосходит по сравнению с прутками стали марки 15X25T.

Выводы

При селективном лазерном плавлении порошков стали марки 15X25T в синтезированном металле происходит формирование ячеистой структуры кристаллизации единичных треков, которая сходна со структурой компактной стали аналогичного состава, подвергнутой пластической деформации. Использование дополнительного переплава ранее перекристаллизованных треков в СЛП стали марки 15X25T приводит к снижению объемной пористости во всем диапазоне скоростей сканирования. Результаты механических испытаний образцов стали марки 15X25T, полученных методом СЛП, показывают, что предел прочности и ударная вязкость образцов примерно в 1,3 – 1,4 раза выше значений механических свойств образцов компактной закаленной стали. Выявлены значительные по величине остаточные напряжения на уровне 236 МПа. Использование дополнительного переплава позволяет понизить этот уровень до 108 МПа.

Результаты микроструктурного анализа поверхностного слоя образцов стали марки 15X25T, полученных СЛП с дополнительным лазерным

Механические свойства образцов стали марки 15X25T при высокой температуре**Table 3. Mechanical properties of steel samples grade 15X25T at high temperature**

Температура испытаний, °С	Значение параметров для прутка / СЛП образца с дополнительным переплавом валиков		
	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
20	445/455	20/22	45/45
700	76/72	46/43	92/82
800	24/20	102/95	98/90
900	18/18	150/133	98/92
1000	11/10	148/135	100/95
1100	8/9	138/130	99/90

Жаростойкость образцов стали марки 15X25T**Table 4. Heat resistance of steel samples 15X25T**

Среда	Температура, °C	Длительность испытаний, ч	Глубина проникновения окислов (окалины), мм/год		Группа стойкости, балл
			Пруток	Образцы СЛП	
Воздух	850	200	0,174	0,162	6
Воздух	950	200	0,294	0,266	6
Воздух	1050	200	0,490	0,420	6
Чистый воздух	900	500	0,390	0,310	6
Чистый воздух + 1,5 % SO ₂	900	500	0,540	0,430	6

переплавом перекристаллизованных треков (мощность лазера 135 Вт и скорость сканирования 450 мм/с), выявили снижение шероховатости поверхности образца с 62 до 12 – 15 мкм.

Исследованы механические свойства, жаростойкость и коррозионная стойкость образцов стали марки 15X25T, полученных СЛП с дополнительным переплавом ранее перекристаллизованных треков. Показано, что полученный материал превосходит по комплексу механических свойств деформированный полуфабрикат из стали марки 15X25T.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапрыкина Н.А., Сапрыкин А.А. Влияние условий послойного лазерного спекания на качество спеченного поверхностного слоя из кобальтхроммолибденового порошка. В кн.: *Актуальные проблемы в машиностроении. Материалы первой Международной научно-практической конференции*. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2014:119–123.
2. Zhou X., Li K., Zhang D., Liu X., Ma J., Liu W., Shen Z., Textures formed in a CoCrMo alloy by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* 2015;631:153–164. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.096>
3. Граф Б., Гоок С.Э., Гуменюк А.В., Ретмайер М. Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной геометрической формы. *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;3(20):34–42.
4. Sghaier T.A.M., Sahlaoui, Mabrouki T., Salem H., Rech J. Selective laser melting of stainless-steel a review of process, microstructure, mechanical properties and post-processing treatments. *International Journal of Material Forming*. 2023;16(4):1–12. <https://doi.org/10.1007/s12289-023-01769-w>
5. Nandhakumar R., Venkatesan K. A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: microstructure, properties, and machinability aspects. *Materials Today Communications*. 2023;35(9-10). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105538>
6. Lu J., Zhuo L. Additive manufacturing of titanium alloys via selective laser melting: Fabrication, microstructure, post-processing, performance and prospect. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;111(8). <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106110>
7. Song X., Zhang Y. Progress of high-entropy alloys prepared using selective laser melting. *Science China Materials*. 2023;66:4165–4181.
8. Chen X., Wen K., Mu W., Zhang Y., Shan Huang, Liu W. Effect of layer-by-layer laser remelting process on the microstructure and performance of selective laser melting 316L stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;128:2221–2236.
9. Bouabbou A., Vaudreuil S. Understanding laser-metal interaction in selective laser melting additive manufacturing through numerical modelling and simulation: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17:543–562. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2052488>
10. Khan, H.M., Waqar, S., Koç, E. Evolution of temperature and residual stress behavior in selective laser melting of 316L stainless steel across a cooling channel. *Rapid Prototyping Journal*. 2022;28(7):1272–1283. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2021-0237>
11. Zhang C., Zheng H., Yang L., Li Y., Jin J., Cao W., Yan Ch., and Sh Y. Mechanical responses of sheet-based gyroid-type triply periodic minimal surface lattice structures fabricated using selective laser melting. *Materials & Design*. 2022;214. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110407>
12. Zhai W., Zhou W., Zhu Z. Selective laser melting of 304L and 316L stainless steels: a comparative study of microstructures and mechanical properties. *Steel Research international*.

- 2022;93(7).
<https://doi.org/10.1002/srin.202100664>
13. Waqar S., Guo K., Sun J. Evolution of residual stress behavior in selective laser melting (SLM) of 316L stainless steel through preheating and in-situ re-scanning techniques. *Optics & Laser Technology*. 2022;149:107806. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107806>
 14. Uçak N., Çiçek A., Aslantaş K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;80(9):414–457. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>
 15. Yao D., Wang J., Li M-P., Zhao T., Cai Y., An X., Zou, R., Zhang H., Fu H., Yang X., Zou Q. Segregation of 316L stainless steel powder during spreading in selective laser melting based additive manufacturing. *Powder Technology*. 2022;397:117096–117096. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117096>
 16. Gatões D., Alves R., Alves B., Vieira M.T. Selective Laser Melting and Mechanical Properties of Stainless Steels. *Materials*. 2022;15(21). <https://doi.org/10.3390/ma15217575>
 17. Галиновский А. Л., Филимонов А. С., Погалева Р.С., Свешников А.С., Кравченко И.Н., Орлов М.А. Исследование баз данных материалов для технологии селективного лазерного плавления. *Электromеталлургия*. 2022;3:18–27. EDN: TABTZE. <https://doi.org/10.31044/1684-5781-2022-0-3-18-27>
 18. Афанасьева Л. Е., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Шероховатость поверхности образцов нержавеющей стали, полученных по технологии селективного лазерного плавления. В кн.: *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2021;14:62–66. EDN: PTMGXO.
 19. То М.Х., Сафонов Е.В., Адылина А.П., Овчинников В.В. Механические свойства и микроструктура стали 12X18H10T, полученной методом селективного лазерного плавления. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2022;20(6):282–287. EDN: OAYGSJ. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2022-20-6-282-287>
 20. Зельдович В.И., Хомская И.В., Хейфец А.Э., Абдуллина Д.Н. Структурные изменения при нагреве в аустенитной нержавеющей стали, полученной методом селективного лазерного плавления. *Физика металлов и металловедение*. 2022;123(9):971–977. EDN: KRARUS. <https://doi.org/10.31857/S0015323022090133>
 21. Кривилев М.Д., Харанжевский Е.В., Камаева Л.В., Закирова Р.М. Анализ уровня остаточных напряжений в компактных образцах из стали 316L, полученных методом селективного лазерного плавления. В кн.: *Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов: Сборник тезисов. Научно-технический семинар*. Москва, 25–27 октября 2022 г. Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2022:82. EDN: IZCBUI.

REFERENCES

1. Saprykina N.A., Saprykin A.A. The influence of layer-by-layer laser sintering conditions on the quality of the sintered surface layer of cobalt-chromium-molybdenum powder. In: *Current issues in mechanical engineering: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU. 2014:119–123. (In Russ.).
2. Zhou X., Li K., Zhang D., Liu X., Ma J., Liu W., Shen Z., Textures formed in a CoCrMo alloy by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* 2015; 631:153–164. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.096>
3. Graf B., Gook S.E., Gumenyuk A.V., Retmaier M. Combined laser additive technologies for the production of turbine blades of complex geometric shapes. *Global'naya yadernaya bezopasnost'*. 2016; 3(20):34–42. (In Russ.).
4. Sghaier T.A.M., Sahlaoui, Mabrouki T., Salem H., Rech J. Selective Laser Melting of Stainless-Steel A Review of Process, Microstructure, Mechanical Properties and Post-Processing treatments. *International Journal of Material Forming*. 2023;16(4):1–12. <https://doi.org/10.1007/s12289-023-01769-w>
5. Nandhakumar R., Venkatesan K. A process parameters review on Selective laser melting-based additive manufacturing of Single and Multi-Material: Microstructure, Properties, and machinability aspects. *Materials Today Communications*. 2023;35(9-10). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105538>
6. Lu J., Zhuo L. Additive manufacturing of titanium alloys via selective laser melting: Fabrication, microstructure, post-processing, performance and prospect. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;111(8). <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2023.106110>

7. Song X., Zhang Y. Progress of high-entropy alloys prepared using selective laser melting. *Science China Materials*. 2023;66:4165–4181.
8. Chen X., Wen K., Mu W., Zhang Y., Shan Huang, Liu W. Effect of layer-by-layer laser remelting process on the microstructure and performance of selective laser melting 316L stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;128:2221–2236.
9. Bouabbou A., Vaudreuil S. Understanding laser-metal interaction in selective laser melting additive manufacturing through numerical modelling and simulation: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17:543–562. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2052488>
10. Khan, H.M., Waqar, S., Koç, E. Evolution of temperature and residual stress behavior in selective laser melting of 316L stainless steel across a cooling channel. *Rapid Prototyping Journal*. 2022;28(7):1272–1283. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2021-0237>
11. Zhang C., Zheng H., Yang L., Li Y., Jin J., Cao W., Yan Ch., and Sh Y. Mechanical responses of sheet-based gyroid-type triply periodic minimal surface lattice structures fabricated using selective laser melting. *Materials & Design*. 2022;214. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110407>
12. Zhai W., Zhou W., Zhu Z. Selective Laser Melting of 304L and 316L Stainless Steels: A Comparative Study of Microstructures and Mechanical Properties. *Steel Research international*. 2022;93(7). <https://doi.org/10.1002/srin.202100664>
13. Waqar S., Guo K., Sun J. Evolution of residual stress behavior in selective laser melting (SLM) of 316L stainless steel through preheating and in-situ re-scanning techniques. *Optics & Laser Technology*. 2022;149:107806. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107806>
14. Uçak N., Çiçek A., Aslantaş K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;80(9):414–457. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>
15. Yao D., Wang J., Li M-P., Zhao T., Cai Y., An X., Zou, R., Zhang H., Fu H., Yang X., Zou Q. Segregation of 316L stainless steel powder during spreading in selective laser melting based additive manufacturing. *Powder Technology*. 2022;397:117096–117096. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117096>
16. Gatões D., Alves R., Alves B., Vieira M.T. Selective Laser Melting and Mechanical Properties of Stainless Steels. *Materials*. 2022;15(21). <https://doi.org/10.3390/ma15217575>
17. Galinovskii A.L., Filimonov A.S., Rogalev R.S., Sveshnikov A.S., Kra-vchenko I.N., Orlov M.A. Research of materials databases for selective laser melting technology. *Elektrometallurgiya*. 2022;3:18–27. EDN: TABTZE. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-5781-2022-0-3-18-27>
18. Afanas'eva L. E., Izmailov V.V., Novoselova M.V. Surface roughness of stainless steel samples obtained by selective laser melting technology. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalei tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2021;14:62–66. EDN: PTMGXO. (In Russ.).
19. To M.Kh., Safonov E.V., Adylina A.P., Ovchinnikov V.V. Mechanical properties and microstructure of 12X18N10T steel obtained by selective laser melting. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2022;20(6):282–287. EDN: OAYGSJ. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2022-20-6-282-287>
20. Zel'dovich V.I., Khomskaya I.V., Kheifets A.E., Abdullina D.N. Structural changes during heating in austenitic stainless steel produced by selective laser melting. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2022;123(9):971–977. EDN: KRARUS. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0015323022090133>
21. Krivilev M.D., Kharanzhevskii E.V., Kamaeva L.V., Zakirova R.M. Analysis of residual stress levels in compact 316L steel specimens produced by selective laser melting. In: *Bernstein Readings on Thermomechanical Processing of Metallic Materials: Collection of Abstracts. Scientific and Technical Seminar*. October 25–27, 2022. Moscow: Natsional'nyi issledovatel'skii tekhnologicheskii universitet «MISIS», 2022:82. EDN: IZCBUI. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Анна Петровна Адылина, к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация», Московский политехнический университет
E-mail: dmitr1eva@mail.ru
ORCID: 0009-0008-6763-9278
SPIN-код: 4076-9283

Виктор Васильевич Овчинников, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение», Московский политехнический университет
E-mail: vikov1956@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2948-2202
SPIN-код: 3367-9330

Иван Сергеевич Кушнир, студент, Московский политехнический университет

E-mail: kushn1r_ivan@mail.ru
ORCID: 0009-0002-5032-468X
SPIN-код: 3925-7441

To Мань Хунг, стажер, Московский политехнический университет
E-mail: manhhungxm@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3987-313X

Information about the authors:

Anna P. Adylina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Certification, Moscow Polytechnic University
E-mail: dmitr1eva@mail.ru
ORCID: 0009-0008-6763-9278
SPIN-код: 4076-9283

Viktor V. Ovchinnikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science, Moscow Polytechnic University
E-mail: vikov1956@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2948-2202
SPIN-код: 3367-9330

Ivan S. Kushnir, student, Moscow Polytechnic University
E-mail: kushn1r_ivan@mail.ru
ORCID: 0009-0002-5032-468X
SPIN-код: 3925-7441

To Man Hung, Intern, Moscow Polytechnic University
E-mail: manhhungxm@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3987-313X

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 05.05.2025
После доработки 19.05.2025
Принята к публикации 26.05.2025

Received 05.05.2025
Revised 19.05.2025
Accepted 26.05.2025