



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Влияние режимов лазерной наплавки на геометрические размеры стального трека





Светлана Долгова^{1, а}, Александр Маликов^{2, б}, Александр Голышев^{2, с}, Аэлита Никулина^{3, д, *}

¹Новосибирский завод полупроводниковых приборов «Восток», ул. Дачная, 60, г. Новосибирск, 630082, Россия

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0003-3918-273X>,  svetlanadolgova99@gmail.com; ^б  <https://orcid.org/0000-0003-1268-8546>,  smalik707@yandex.ru;

^с  <https://orcid.org/0000-0002-4243-0602>,  alexgol@itam.nsc.ru; ^д  <https://orcid.org/0000-0001-9249-2273>,  a.nikulina@corp.nstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.725

История статьи:

Поступила: 15 марта 2024

Рецензирование: 13 апреля 2024

Принята к печати: 17 апреля 2024

Доступно онлайн: 15 июня 2024

Ключевые слова:

Аддитивные технологии

Волоконный лазер

Единичные треки

Оптимизация

Макроструктура

Аустенитная сталь 316L

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН.

АННОТАЦИЯ

Введение. Лазерная наплавка – одно из ведущих направлений в области аддитивных технологий, заключающееся в послойном наращивании материала при использовании лазера в качестве источника энергии. Для получения качественного изделия необходимо правильно подобрать оптимальные параметры выращивания. Проблема заключается в том, что такая оптимизация необходима для каждого оборудования, поскольку незначительные отличия в его характеристиках могут вносить существенные изменения в параметры послойного выращивания. Для того чтобы определить оптимальный режим выращивания, достаточно проанализировать влияние различных параметров оборудования на характеристики единичных треков. Поэтому **цель данной работы** заключается в определении наиболее важных параметров лазерного излучения, влияющих на процесс наплавки, и оптимального режима выращивания единичного трека хромоникелевой стали. **В работе исследованы** единичные треки, полученные лазерной наплавкой порошка из аустенитной хромоникелевой стали марки AISI 316L. В качестве факторов оптимизации выступали такие характеристики, как мощность лазера, скорость движения луча, расход подаваемого порошка и размер лазерного пятна. Длина волны лазерного излучения составляла 1,07 мкм. **Методы исследования.** Для определения качества и геометрических размеров одиночных треков исследовалась макроструктура поперечных сечений образцов с использованием методов металлографии и растровой электронной микроскопии. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что оптимальный режим выращивания единичных треков стали 316L характеризуется мощностью лазерного излучения 1250 Вт и скоростью сканирования 25 мм/с. При этом оптимальный показатель расхода порошка составляет 12 г/мин, а размер лазерного пятна – 4,1 мм. В работе показано, что наибольшее влияние на коэффициент эффективного использования порошкового материала оказывают расход порошка и размер лазерного пятна. Их изменение позволяет повысить производительность наплавки на 10–15 %.

Для цитирования: Влияние режимов лазерной наплавки на геометрические размеры стального трека / С.В. Долгова, А.Г. Маликов, А.А. Голышев, А.А. Никулина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 57–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-57-70.

Введение

Традиционные методы подготовки сталей до сих пор являются одним из наиболее универсальных и основных способов изготовления изделий. Однако для производства одного вида готовой продукции иногда требуется огромное количество деталей с предварительно проведен-

ной процедурой формообразования и различными способами соединения их друг с другом. Применение аддитивных технологий в качестве метода создания изделий оказалось многообещающим способом прямого изготовления металлических деталей сложной геометрии с функциональной структурой [1, 2]. Данная методика способна сократить отходы и сэкономить исходное сырье. Многие авторы также утверждают, что благодаря уникальному тепловому режиму, возникающему во время лазерного выращивания, можно регулировать химический состав, влиять на металлургию, получать определенную

*Адрес для переписки

Никулина Аэлита Александровна, д.т.н., профессор

Новосибирский государственный технический университет,

пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

микроструктуру и улучшать механические свойства изготавливаемых деталей [3–5].

На настоящий момент существует огромное количество методик послойного выращивания изделий, однако одним из главных методов аддитивного производства является лазерная наплавка. Причина тому – универсальность, простота и распространенность технологии [6]. Указанная методика позволяет получать детали с низкой шероховатостью поверхности за счет меньшего размера лазерного луча, меньшей толщины слоя и короткого шага в сравнении с другими аддитивными технологиями. Данный метод подготовки также позволяет наносить дополнительный материал на готовое изделие с целью ремонта и восстановления детали [5–8]. Лазерная технология обеспечивает получение плотных деталей, без окисления поверхности в процессе выращивания за счет использования среды защитных газов, а также позволяет использовать несколько материалов в одной сборке (Functionally Gradient Material или FGM-образцы) [9–13].

Существует огромное количество исследований по различным аспектам лазерных аддитивных технологий, и одной из самых распространенных тем является оптимизация параметров обработки. Именно благодаря правильно подобраным режимам послойного наращивания можно оценить наличие физических дефектов, что говорит о качестве получаемой продукции [5, 8], а также позволяет повысить эффективность производства [7]. Ученые занимались темой оптимизации параметров с применением различных методик исследований. В работе [5] авторы выбрали режимы формирования единичных треков для волоконного лазера посредством перебора наиболее используемых режимов в матрице планирования. В исследовании [14] авторы использовали методику регрессионного анализа для определения влияния на формируемые треки мощности волоконного лазера с коаксиальным соплом, скорости наплавки, а также распределения порошка в подающей струе. Они установили, что при постоянной мощности лазера с увеличением скорости наплавки высота и площадь поперечного сечения уменьшаются, а при увеличении скорости подачи порошка – увеличиваются. При постоянных скоростях и изменении мощности площадь поперечного

сечения увеличивается, а распределение порошка никак не влияет на геометрию трека. Аналогичные результаты получили авторы статьи [7], применяя методику ANOVA (analysis of variance – дисперсионный анализ). Они пришли к выводу, что разные параметры влияют на геометрические размеры трека по-разному. На высоту трека основное влияние оказывают скорость наплавки и скорость подачи порошка. Влияние мощности составляет около 1 %. Однако при исследовании ширины трека основными влияющими факторами являлись мощность и скорость сканирования. В работе [15] также изучали влияние различных режимов волоконного лазера на формирование одиночного трека. Авторы подтвердили, что увеличение скорости подачи порошка отрицательно влияет на качество сцепления между наплавленной дорожкой и подложкой, а скорость перемещения лазера отрицательно влияет на площадь поперечного сечения и положительно влияет на ширину наплавленного слоя. Мощность лазера оказывает существенное влияние на высоту и ширину формируемого трека в сравнении со скоростью сканирования и скоростью подачи порошка.

Поскольку при различных исследованиях используется разное оборудование и разные материалы исследования, то, несмотря на идентичную технологию послойного нанесения, полученные результаты могут существенно отличаться. Тем самым данная тематика до сих пор остается актуальной. Поэтому *целью настоящей работы* является определение наиболее важных параметров лазерного излучения, влияющих на процесс наплавки, и оптимального режима для получения качественных единичных треков из стали AISI 316L при использовании волоконного лазера.

Методика исследований

Исследуемый материал

Для исследования влияния режимов наращивания на получение качественных одиночных треков был использован порошок стали AISI 316L. Средний размер частиц составлял 15...45 мкм. Наплавление стального порошка проводилось на пластину из стали марки 12X18H10T с размерами 50×50×5 мм. Химический состав используемых сплавов представлен в табл. 1.

Химический состав исследуемых материалов
Chemical composition of the materials under study

Материал/ Material	Химический элемент, вес. % / Chemical element, wt. %/								
	C	Mn	Si	S	P	Ti	Cr	Ni	Fe
AISI 316L	0,025	0,84	0,68	0,015	0,01	0,71	18,69	8,84	Осн / Bas
12X18H10T / 1.2-Cr18-Ni10-Ti	0,11	1,082	0,447	0,002	0,027	0,002	17,15	7,85	Осн / Bas

Используемое оборудование

Наплавка осуществлялась методом прямого лазерного выращивания (Direct Metal Deposition). При использовании этого метода лазерное излучение фокусируется с помощью линзы на подложку, образуя ванну расплава. Соосно лазерному излучению через коаксиальное сопло подается порошковая смесь. При перемещении лазерного излучения ванна расплава затвердевает, образуя наплавочный валик. Формирование одиночных треков проводилось на созданном в ИТПМ СО РАН оборудовании «Наплавочно-сварочный комплекс на базе многокоординатной руки и волоконного лазера» с мощностью иттербиевого лазера 3 кВт (производства IPGphotonics) и длиной волны излучения 1,07 мкм (рис. 1). Аргон использовался в качестве газа-носителя, а также защитной среды в процессе выращивания.

Для определения размеров и качества формируемых треков были использованы оптический микроскоп Olympus LEXT OLS 3000 и растровый электронный микроскоп Carl Zeiss EVO 50 XVP (ЦКП ССМ НГТУ). Поперечные сечения образцов для исследования подготавливали по стандартной методике шлифования и полирования. Травление шлифов производилось с использованием химического травителя состава HNO_3 : HCl = 1:3.

Условия эксперимента

Параметры оборудования, плотность энергии, скорость сканирования, скорость потока газа и другие параметры играют важную роль в определении особенностей микроструктуры, качества детали и производительности самого



Рис. 1. Автоматизированный лазерный комплекс

Fig. 1. Automated laser complex

процесса. Поэтому для определения оптимальных режимов выращивания стального изделия методом прямого лазерного выращивания необходимо исследовать поведение материала при формировании единичных треков. Выбор первоначальных значений параметров основан на данных работ [16–23]. Диапазон значений основных параметров: мощность лазера 1000...1500 Вт, скорость сканирования 15...35 мм/с, расход порошка 12...36 г/мин (частота вращения диска подачи 4...12 % соответственно) и размер лазерного пятна 2,9...5,6 мм. Такие параметры, как расход порошка и размер лазерного пятна, изменялись после определения оптимальной мощности и скорости сканирования.

Условия выборки

В процессе аддитивного производства из-за особенностей материала исследования, параметров оборудования и режимов выращивания

могут возникать различные дефекты наплавки. Поэтому для определения оптимального режима выращивания анализировались геометрические размеры, угол смачивания с подложкой, наличие пор и трещин в зоне соединения полученных единичных треков и подложки. В работе будет оцениваться соотношение 1:3 между толщиной и шириной наплавленного слоя, так как при несоблюдении данного соотношения в процессе создания массива могут формироваться межслойные поры [8, 24]. В настоящей статье также будет введено понятие коэффициента эффективного наращивания – коэффициента полезного расхода материала, основанного на отношении массы наплавленного металла к норме расхода порошка. Эта характеристика оценивает потери материала в процессе наплавки.

Результаты и их обсуждение

Макроструктура и геометрические размеры полученных треков

С целью определения наиболее подходящего режима наращивания для построения массивов необходимо оценить геометрические размеры

и наличие дефектов в зоне наплавленного слоя у единичных треков. В табл. 2 представлены геометрические характеристики наплавленного стального порошка.

Макроструктура поперечных сечений стали 316L представлена на рис. 2–6. Как можно заметить, с повышением скорости высота исследуемых треков уменьшается, что в дальнейшем увеличивает ширину наплавленного слоя (рис. 2–4). Это можно объяснить уменьшением линейного расхода энергии (формированием меньшей ванны расплава) и уменьшением массового расхода порошка на единицу длины при постоянной скорости подачи. Повышение мощности аналогичным образом изменяло геометрические размеры трека (рис. 2–4).

Угол смачивания наплавленного слоя с подложкой является одним из наиболее важных параметров, определяющих однородность трека. В некоторых образцах при минимальных значениях скорости был обнаружен отрицательный боковой угол (рис. 2, а; 3, а, б; 4, а), который может стать причиной отслоения материала от подложки и наличия межслойных пор. С повышением мощности и скорости сканирования угол

Таблица 2

Table 2

Геометрические размеры единичных треков
Geometric dimensions of single tracks

Мощность, Вт / Power, W	Скорость, мм/с / Speed, mm/s	Расход, % / Consumption, %	Диаметр пучка, мм / Beam diameter, mm	Высота, мкм / Height, μm	Ширина, мкм / Width, μm	Глубина проплавления, мкм / Penetration depth, μm	Угол смачивания, град / Contact angle, °
1000	15	8	2,9	825	1177	579	38
1000	25	8	2,9	540	1285	552	132
1000	35	8	2,9	402	1100	431	117
1250	15	8	2,9	935	1305	738	43
1250	25	8	2,9	620	1213	571	47
1250	35	8	2,9	445	1202	534	143
1500	15	8	2,9	790	1485	1286	33
1500	25	8	2,9	540	1527	1089	117
1500	35	8	2,9	397	1312	969	77
1250	25	4	2,9	245	1642	872	155
1250	25	12	2,9	765	1197	485	67
1250	25	4	4,1	305	1567	655	130
1250	25	4	5,6	345	1775	552	134

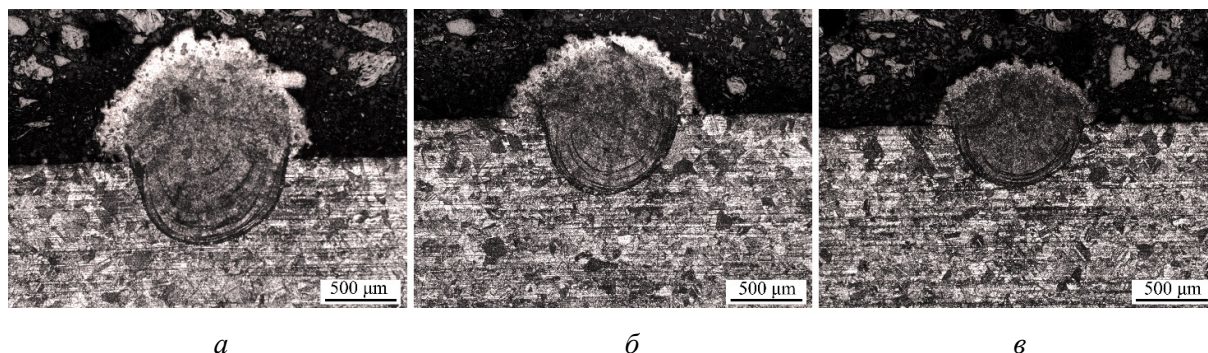


Рис. 2. Поперечные сечения треков, полученных при мощности 1000 Вт, расходе порошка 24 г/мин, размере лазерного пятна 2,9 мм, скорости 15 мм/с (а), 25 мм/с (б), 35 мм/с (в)

Fig. 2. Cross sections of tracks obtained at a power of 1,000 W, powder consumption 24 g/min, laser spot size 2.9 mm, speed 15 mm/s (a), 25 mm/s (b), 35 mm/s (c)

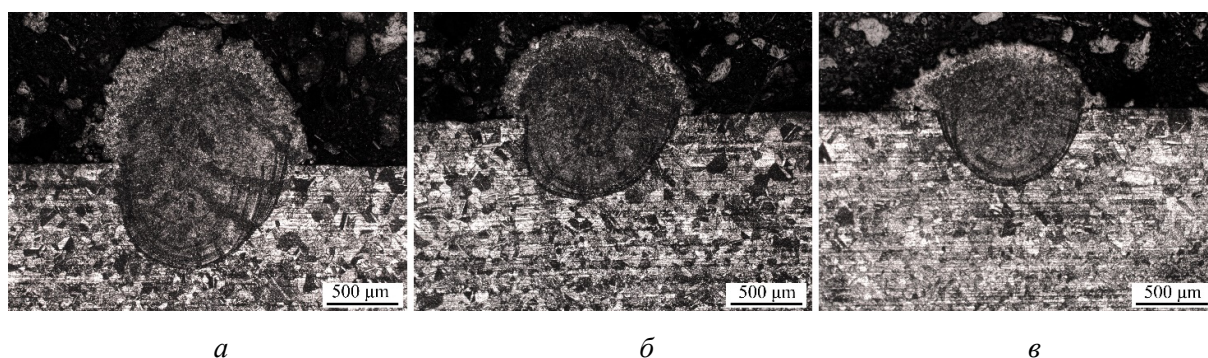


Рис. 3. Поперечные сечения треков, полученных при мощности 1250 Вт, расходе порошка 24 г/мин, размере лазерного пятна 2,9 мм, скорости 15 мм/с (а), 25 мм/с (б), 35 мм/с (в)

Fig. 3. Cross sections of tracks obtained at a power of 1,250 W, powder flow rate 24 g/min, laser spot size 2.9 mm, speed 15 mm/s (a), 25 mm/s (b), 35 mm/s (c)

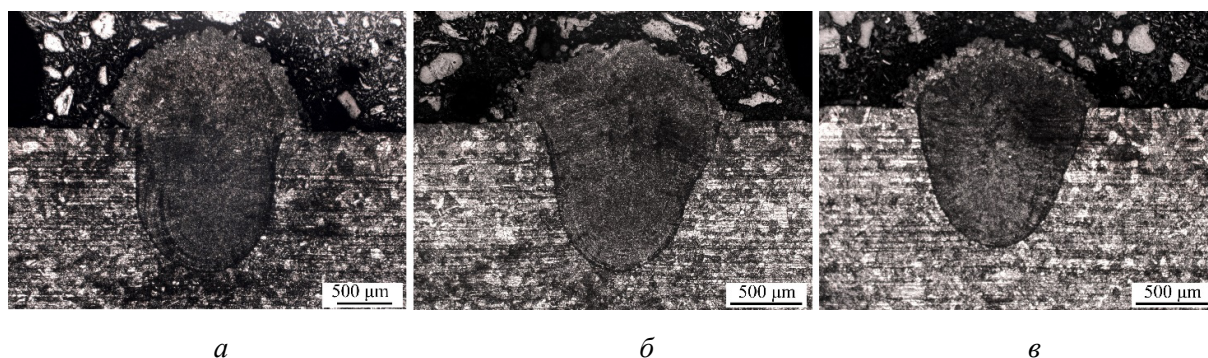


Рис. 4. Поперечные сечения треков, полученных при мощности 1500 Вт, расходе порошка 24 г/мин, размере лазерного пятна 2,9 мм, скорости 15 мм/с (а), 25 мм/с (б), 35 мм/с (в)

Fig. 4. Cross sections of tracks obtained at a power of 1,500 W, powder flow rate 24 g/min, laser spot size 2.9 mm, speed 15 mm/s (a), 25 mm/s (b), 35 mm/s (c)

смачивания увеличивался до соприкосновения с границей подложки за счет изменения геометрических размеров трека (рис. 2–4).

Основным геометрическим показателем, также необходимым для выявления оптимального режима выращивания, является глубина про-

плавления. С увеличением мощности глубина проплавленной области увеличивается, однако при увеличении скорости сканирования наблюдается обратный эффект (рис. 2–4). Максимальная глубина проплавления (1286 мкм) соответствует наибольшему значению мощности с мини-

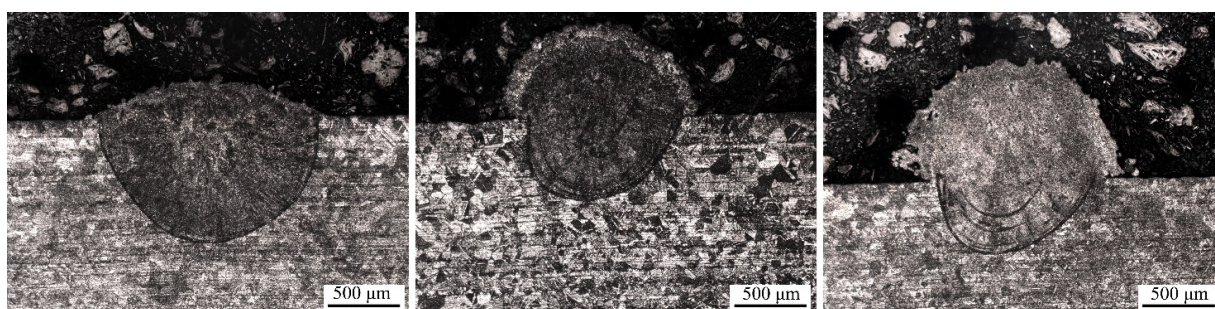
мальным показателем скорости сканирования (1500 Вт и 15 мм/с). Причиной тому является большое количество энергии, поданное в локальное место плавления. Этот эффект свидетельствует о том, что при использовании максимальной скорости сканирования мощность лазера также должна быть максимальной.

На основе анализа полученных данных в качестве параметров оптимального режима были выбраны мощность и скорость выращивания, составляющие 1250 Вт и 25 мм/с соответственно, так как при этом режиме формировались аккуратные треки без крупных пор, а в процессе наплавки присутствовало минимальное искрообразование (рис. 3, б). Однако условие, описанное в работе [8], не было выполнено, так как варьировались не все параметры. Поэтому на основе данного режима при постоянной мощности и скорости сканирования далее проводили ис-

следование влияния расхода порошка и размера лазерного пятна на единичные треки.

При использовании скорости подачи порошка 12 г/мин формировалась минимальная высота трека, так как с повышением этой характеристики происходит увеличение массового расхода порошка (рис. 5). Однако при увеличении размера лазерного пятна высота трека увеличивалась (рис. 6).

При повышении мощности сканирования глубина расплавленной подложки увеличивается за счет увеличения количества лазерной энергии, проникающей в подложку (рис. 7). Однако с повышением скорости сканирования глубина проникновения слоя уменьшается вследствие уменьшения удельной энергии лазера в процессе наплавки. Повышение расхода порошка и размера лазерного пятна уменьшает глубину проникновения слоя по аналогичной причине (рис. 8, 9).



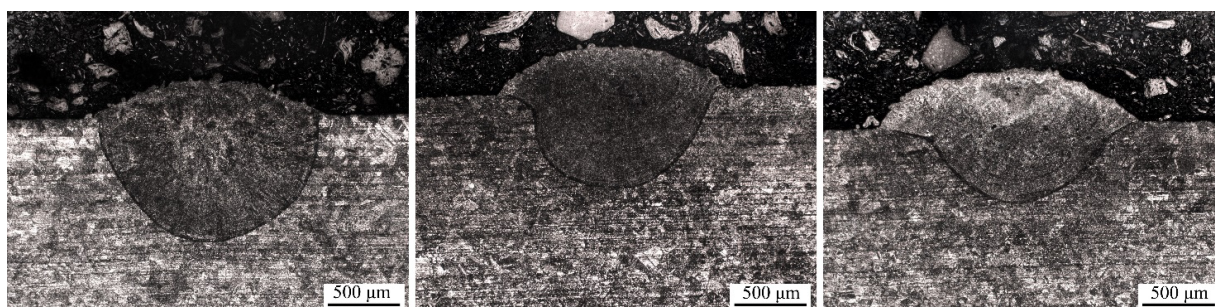
а

б

в

Рис. 5. Поперечные сечения треков, изготовленных при мощности 1250 Вт, скорости 25 мм/с, размере лазерного пятна 2,9 мм, расходе порошка 12 г/мин (а), 24 г/мин (б), 36 г/мин (в)

Fig. 5. Cross sections of tracks produced at a power of 1,250 W, speed 25 mm/s, laser spot size 2.9 mm, powder consumption 12 g/min (a), 24 g/min (b), 36 g/min (v)



а

б

в

Рис. 6. Поперечные сечения треков, изготовленных при мощности 1250 Вт, скорости 25 мм/с, расходе порошка 12 г/мин, размере лазерного пятна 2,9 мм (а), 4,1 мм (б), 5,6 мм (в)

Fig. 6. Cross sections of tracks produced at a power of 1,250 W, speed 25 mm/s, powder consumption 12 g/min, laser spot size 2.9 mm (a), 4.1 mm (b), 5.6 mm (v)

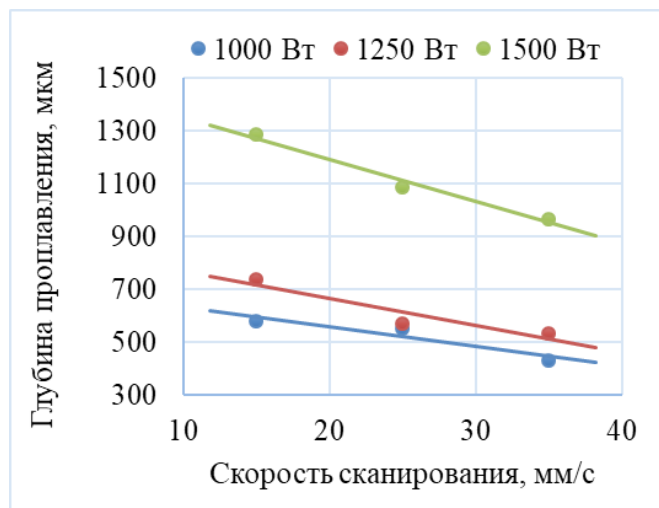


Рис. 7. Изменение глубины проплавления при варьировании мощности и скорости выращивания, размер лазерного пятна 2,9 мм, расход порошка 24 г/мин

Fig. 7. Change in penetration depth with varying power and build speed, laser spot size 2.9 mm, powder consumption 24 g/min

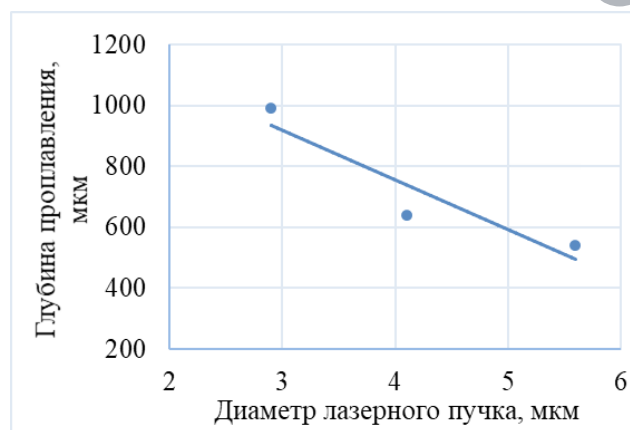


Рис. 9. Влияние изменения размера лазерного пятна на глубину проплавления при мощности 1250 Вт, скорости 25 мм/с, расходе порошка 12 г/мин

Fig. 9. Effect of changing the size of the laser spot on the penetration depth at a power of 1,250 W, speed 25 mm/s, powder flow rate 12 g/min

Коэффициент полезного расхода материала

Определение коэффициента полезного расхода материала проводилось по формуле [25]:

$$K_{\text{эф}} = \frac{m}{P},$$

где m – масса наплавленного слоя, определенная по объему наплавленного материала за минуту, г/мин; P – расход порошка в процессе наращивания, г/мин.

Масса наплавленного слоя определялась по площади поперечного сечения полученных треков. Результаты представлены в табл. 3. Средний коэффициент эффективного использования порошка в процессе прямого лазерного выращивания составил 20–23 %. Аналогичный результат был получен в работе [26]. Анализируя рис. 11, можно прийти к выводу, что с повышением скорости и мощности лазерного излучения потери массы порошка в процессе наращивания изменяются незначительно, что указывает на отсутствие влияния этих двух параметров на производительность наращивания.

Увеличение расхода порошка повышает коэффициент полезного расхода материала (рис. 12) из-за взаимодействия большего количества частиц друг с другом. Однако изменение диаметра лазерного пучка в процессе выращивания показало значительное увеличение коэф-

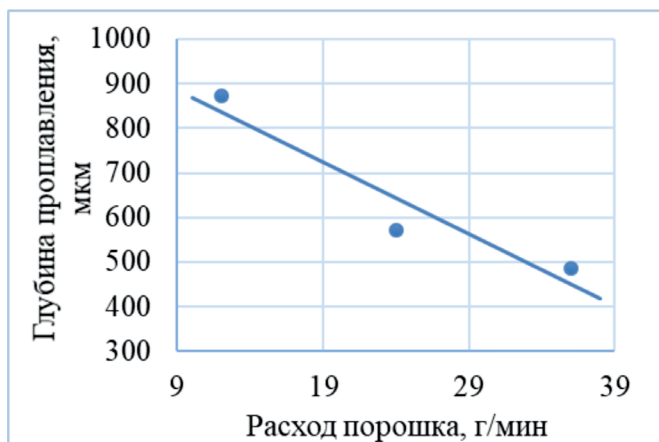


Рис. 8. Зависимость глубины проплавления от расхода порошка при мощности 1250 Вт, скорости сканирования 25 мм/с, размере лазерного пятна 2,9 мм

Fig. 8. Dependence of penetration depth on powder consumption at a power of 1,250 W, scanning speed 25 mm/s, laser spot size 2.9 mm

В образцах при минимальной скорости сканирования, а также при большом расходе порошка на границе проплавленного материала и подложки образовывались трещины, вызванные растягивающими напряжениями (рис. 10).

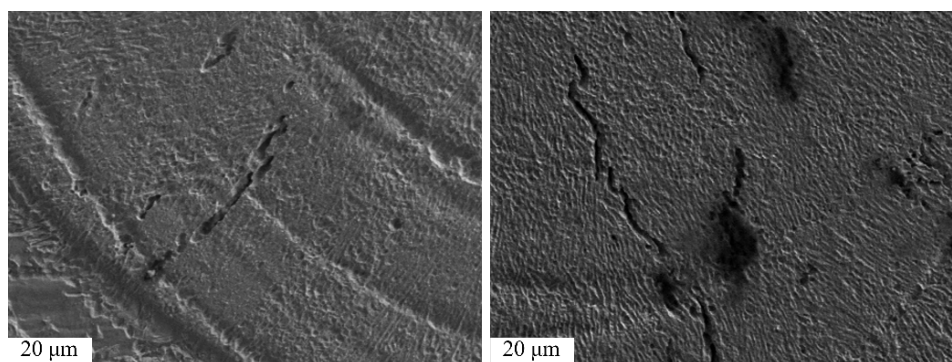

a
б

Рис. 10. Наличие трещин в проплавленном слое:

a – мощность 1000 Вт, скорость сканирования 15 мм/с, расход порошка 24 г/мин;

б – мощность 1250 Вт, скорость 15 мм/с, расход порошка 24 г/мин

Fig. 10. Presence of cracks in the fused layer:

a – power 1,000 W, scanning speed 15 mm/s, powder flow rate 24 g/min;

б – power 1,250 W, speed 15 mm/s, powder flow rate 24 g/min

Таблица 3

Table 3

Коэффициент эффективности наплавки

Surfacing efficiency coefficient

Мощность, Вт / Power, W	Скорость, мм/с / Speed, mm/s	Расход порошка, % / Powder consumption, %	Диаметр пучка, мм / Beam diameter, mm	Коэффициент, % / Coefficient, %
1000	15	8	2,9	21,1
1000	25	8	2,9	21,4
1000	35	8	2,9	20
1250	15	8	2,9	24,8
1250	25	8	2,9	26,5
1250	35	8	2,9	24,6
1500	15	8	2,9	23,3
1500	25	8	2,9	23,7
1500	35	8	2,9	21,9
1250	25	4	2,9	24,6
1250	25	12	2,9	28,5
1250	25	4	4,1	32,2
1250	25	4	5,6	43,1

фициента эффективности наплавки (рис. 13). Объясняется это увеличением диаметра пятна на материале.

Закключение

В работе было исследовано влияние параметров выращивания на геометрические размеры единичных треков из аустенитной стали 316L

с использованием волоконного лазера. В ходе исследования было подтверждено, что с увеличением скорости сканирования и мощности лазера происходит уменьшение высоты единичного трека с увеличением его ширины. На основе анализа геометрических размеров, угла смачивания с подложкой, наличия пор и трещин в зоне соединения полученных единичных треков и подложки был определен оптимальный

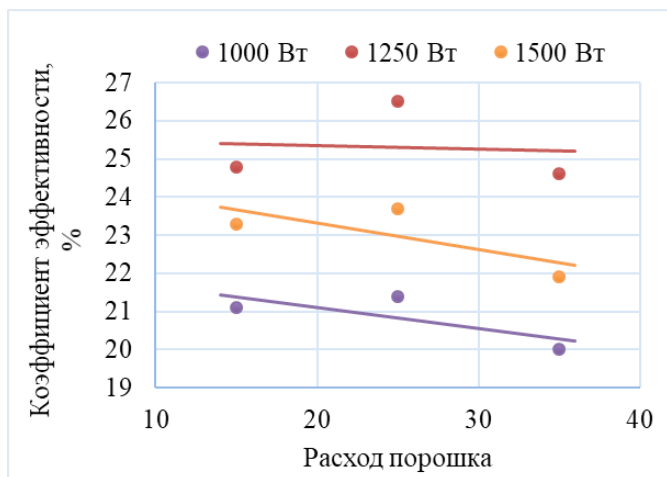


Рис. 11. Влияние изменения мощности на коэффициент полезного расхода материала; диаметр пучка 2,9 мм, расход порошка 24 г/мин

Fig. 11. Effect of power changes on the coefficient of useful material consumption: beam diameter 2.9 mm, powder flow rate 24 g/min

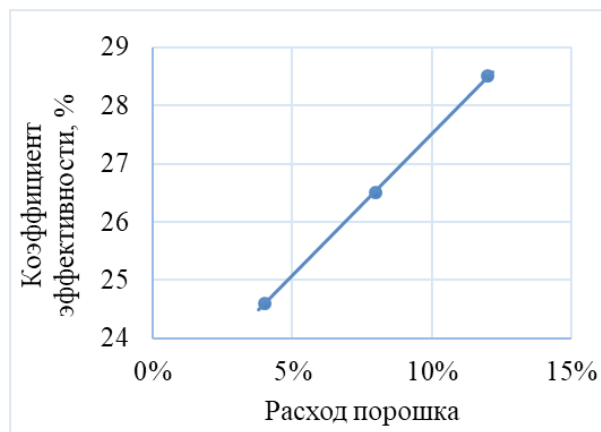


Рис. 12. Влияние изменения расхода порошка на коэффициент полезного расхода материала; мощность 1250 Вт, скорость 25 мм/с, диаметр пучка 2,9 мм

Fig. 12. Effect of changes in powder consumption on the coefficient of useful material consumption; power 1,250 W, speed 25 mm/s, beam diameter 2.9 mm

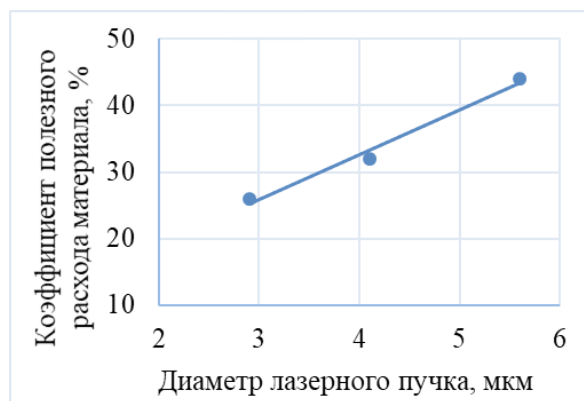


Рис. 13. Влияние диаметра лазерного пучка на коэффициент полезного расхода материала; мощность 1250 Вт, скорость 25 мм/с, расход порошка 12 г/мин

Fig. 13. Influence of the laser beam diameter on the coefficient of useful material consumption; power 1,250 W, speed 25 mm/s, powder flow rate 12 g/min

режим выращивания, мощность лазера и скорость сканирования для которого составили 1250 Вт и 25 мм/с соответственно. При повышении мощности лазера происходит активное искрообразование, что сопровождается увеличением глубины проплавления и увеличением шероховатости поверхности. Изменение параметров расхода порошка и диаметра лазерного пучка привело к тому, что единичные треки характеризовались меньшей шероховатостью и полным смачивани-

ем поверхности. Оптимальный расход порошка отмечен при частоте вращения диска 4 % (соответственно расход порошка – 12 г/мин). Диаметр пучка, при котором характеристики единичных треков оптимальны, составил 4,1 мм.

Производительность прямого лазерного выращивания в настоящей работе составила около 20–23 %. Было установлено, что наибольшее влияние на коэффициент эффективного использования материала оказывают такие характери-

стики, как расход порошка и диаметр лазерного пучка. Их изменение позволяет повысить производительность на 10–15 %.

Список литературы

1. Gadagi B., Lekurwale R. A review on advances in 3D metal printing // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 45. – P. 277–283. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.436.
2. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications / D. Svetlizky, M. Das, B. Zheng, A.L. Vyatskikh, S. Bose, A. Bandyopadhyay, J.M. Schoenung, E.J. Lavernia, N. Eliaz // *Materials Today*. – 2021. – Vol. 49. – P. 271–295. – DOI: 10.1016/j.mattod.2021.03.020.
3. Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting / K. Saeidi, X. Gao, Y. Zhong, Z.J. Shen // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 625. – P. 221–229. – DOI: 10.1016/j.msea.2014.12.018.
4. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior – A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting / F. Bartolomeu, M. Buciumeanu, E. Pinto, N. Alves, O. Carvalho, F.S. Silva, G. Miranda // *Additive Manufacturing*. – 2017. – Vol. 16. – P. 81–89. – DOI: 10.1016/j.addma.2017.05.007.
5. Analysis of the process parameter influence in laser cladding of 316L stainless steel / P. Alvarez, M.Á. Montealegre, J.F. Pulido-Jiménez, J.I. Arrizubieta // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2018. – Vol. 2 (3). – P. 55. – DOI: 10.3390/jmmp2030055.
6. Pinkerton A.J. Lasers in additive manufacturing // *Optics & Laser Technology*. – 2016. – Vol. 78. – P. 25–32. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.09.025.
7. Goodarzi D.M., Pekkarinen J., Salminen A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry // *Welding in the World*. – 2017. – Vol. 61 (5). – P. 883–891. – DOI: 10.1007/s40194-017-0495-0.
8. Dutta B. Directed Energy Deposition (DED) Technology // *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. – 2022. – Vol. 3. – P. 66–84. – DOI: 10.1016/B978-0-12-819726-4.00035-1.
9. Parametric study of development of Inconel-steel functionally graded materials by laser direct metal deposition / K. Shah, Izhar ul Haq, A. Khan, S.A. Shah, M. Khan, A.J. Pinkerton // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 54. – P. 531–538. – DOI: 10.1016/j.matdes.2013.08.079.
10. Functionally graded material of 304L stainless steel and Inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling / B.E. Carroll, R.A. Otis, J.P. Borgonia, J. Suh, R.P. Dillon, A.A. Shapiro, D.C. Hofmann, Z.-K. Liu, A.M. Beese // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 108. – P. 46–54. – DOI: 10.1016/j.actamat.2016.02.019.
11. Laser rapid manufacturing of stainless steel 316L/Inconel718 functionally graded materials: microstructure evolution and mechanical properties / D. Wu, X. Liang, Q. Li, L. Jiang // *International Journal of Optics*. – 2010. – Vol. 2010. – P. 802385. – DOI: 10.1155/2010/802385.
12. Development and characterization of 316L/Inconel 625 functionally graded material fabricated by laser direct metal deposition / B. Chen, Y. Su, Z. Xie, C. Tan, J. Feng // *Optics & Laser Technology*. – 2020. – Vol. 123. – P. 105916. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105916.
13. Interfacial characterization and mechanical properties of 316L stainless steel/inconel 718 manufactured by selective laser melting / X. Mei, X. Wang, Y. Peng, H. Gu, G. Zhong, Y. Sh // *Material Science and Engineering: A*. – 2019. – Vol. 758. – P. 185–191. – DOI: 10.1016/j.msea.2019.05.011.
14. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process / H. El Cheikh, B. Courant, S. Branchu, J.-Y. Hascoët, R. Guillén // *Optics and Laser in Engineering*. – 2012. – Vol. 50 (3). – P. 413–422. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.10.014.
15. Effect of process parameters on the cladding track geometry fabricated by laser cladding / Y. Zhao, Ch. Guan, L. Chen, J. Sun, T. Yu // *Optik*. – 2020. – Vol. 223. – P. 165447. – DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.165447.
16. An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition / A. Saboori, G. Piscopo, M. Lai, A. Salmi, S. Biamino // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 780. – P. 139179. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139179.
17. Self-heating behavior during cyclic loadings of 316L stainless steel specimens manufactured or repaired by Directed Energy Deposition / Y. Balit, L.-R. Joly, F. Szmytka, S. Durbecq, E. Charkaluk, A. Constantinescu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 786. – P. 139476. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139476.
18. Tensile and ductile fracture properties of as-printed 316L stainless steel thin walls obtained by directed energy deposition / P. Margerit, D. Weisz-Patrault, K. Ravi-Chandar, A. Constantinescu // *Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 37. – P. 101664. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101664.
19. Fracture analysis in directed energy deposition (DED) manufactured 316L stainless steel using a phase-field approach / E. Azinpour, R. Darabi, J.C. de Sa, A. Santos, J. Hodek, J. Dzugan // *Finite Elements in*

Analysis and Design. – 2020. – Vol. 177. – P. 103417. – DOI: 10.1016/j.fincl.2020.103417.

20. Effect of build height on the properties of large format stainless steel 316L fabricated via directed energy deposition / D.R. Feenstra, V. Cruz, X. Gao, A. Molotnikov, N. Birbilis // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 34. – P. 101205. – DOI: 10.1016/j.addma.2020.101205.

21. Microstructural banding of directed energy deposition-additively manufactured 316L stainless steel / Y. Hwa, Ch.S. Kumai, Th.M. Devine, N. Yang, J.K. Yee, R. Hardwick, K. Burgmann // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 69. – P. 96–105. – DOI: 10.1016/j.jmst.2020.08.022.

22. Characterisation of porosity, density, and microstructure of directed energy deposited stainless steel AISI 316L / Z.E. Tan, J.H. Lye Pang, J. Kaminski, H. Pepin // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 25. – P. 286–296. – DOI: 10.1016/j.addma.2018.11.014.

23. *Mukherjee M.* Effect of build geometry and orientation on microstructure and properties of additively

manufactured 316L stainless steel by laser metal deposition // Materialia. – 2019. – Vol. 7. – P. 100359. – DOI: 10.1016/j.mtla.2019.100359.

24. *Dutta B., Babu S., Jared B.H.* Science, technology and applications of metals in additive manufacturing. – Elsevier, 2019. – 343 p. – ISBN 978-0-12-816634-5. – DOI: 10.1016/C2017-0-04707-9.

25. Справочник по специальным работам: сварочные работы в строительстве. В 2 ч. Ч. 1 / под ред. В.Д. Тарана. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Стройиздат, 1971. – 415 с.

26. Влияние технологических параметров на производительность при изготовлении металлических деталей методом прямого лазерного выращивания / Ю.Н. Завалов, А.В. Дубров, П.С. Родин, А.Н. Антонов, Е.С. Макарова, С.В. Стенькин, В.Д. Дубров // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы V Международной конференции, 22 марта 2019 г. – М.: ВИАМ, 2019. – С. 121–130.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



The effect of laser surfacing modes on the geometrical characteristics of the single laser tracks

Svetlana Dolgova^{1, a}, Alexandr Malikov^{2, b}, Alexander Golyshev^{2, c}, Aelita Nikulina^{3, d, *}

¹ Novosibirsk semiconductor device plant Vostok, 60 Dachnaya st., Novosibirsk, 630082, Russian Federation

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-3918-273X>, svetlanadolgova99@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0003-1268-8546>, smalik707@yandex.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-4243-0602>, alexgol@itam.nsc.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0001-9249-2273>, a.nikulina@corp.nstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 March 2024

Revised: 13 April 2024

Accepted: 17 April 2024

Available online: 15 June 2024

Keywords:

Additive technologies,

Fiber laser,

Single tracks,

Optimization,

Macrostructure,

Austenitic steel 316L

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the ITAM SB RAS.

ABSTRACT

Introduction. Laser surfacing is one of the leading trends in the field of additive technologies, which consists in layer-by-layer build of material using a laser as an energy source. To obtain a high-quality product, it is necessary to select the optimal building parameters correctly. The problem is that such optimization is necessary for all equipment, since minor differences in its characteristics can make significant changes in the parameters of layer-by-layer build. In order to determine the optimal build mode, it is enough to analyze the effect of various equipment parameters on the characteristics of single tracks. Therefore, **the purpose of this work** is to determine the most important parameters of laser radiation that affect the surfacing process and the optimal mode for building a single track of chromium-nickel steel. **The work investigated** single tracks obtained by laser surfacing of powder from austenitic chromium-nickel steel *AISI 316L*. The optimization factors included such characteristics as laser power, beam speed, flow rate of supplied powder and laser spot size. The wavelength of laser radiation was 1.07 μm. **Research methods.** To determine the quality and geometric dimensions of single tracks, the macrostructure of cross sections of specimens was studied using metallography and scanning electron microscopy methods. **Results and discussion.** It is established that the optimal mode for growing single tracks of steel *AISI 316L* is characterized by a laser radiation power of 1,250 W and a scanning speed of 25 mm/s. In this case, the optimal powder consumption rate is 12 g/min, and the laser spot size is 4.1 mm. The work shows that the powder consumption and laser spot size have the greatest influence on the coefficient of effective use of powder material. By changing it, the surfacing performance can be increased by 10–15 %.

For citation: Dolgova S.V., Malikov A.G., Golyshev A.A., Nikulina A.A. The effect of laser surfacing modes on the geometrical characteristics of the single laser tracks. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 57–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-57-70. (In Russian).

References

1. Gadagi B., Lekurwale R. A review on advances in 3D metal printing. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pp. 277–283. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.436.
2. Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A.L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J.M., Lavernia E.J., Eliaz N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 2021, vol. 49, pp. 271–295. DOI: 10.1016/j.mattod.2021.03.020.
3. Saeidi K., Gao X., Zhong Y., Shen Z.J. Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 625, pp. 221–229. DOI: 10.1016/j.msea.2014.12.018.

* Corresponding author

Nikulina Aelita A., D.Sc. (Engineering), Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: +7 (383) 346-11-71, e-mail: a.nikulina@corp.nstu.ru

4. Bartolomeu F., Buciumeanu M., Pinto E., Alves N., Carvalho O., Silva F.S., Miranda G. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior – A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Additive Manufacturing*, 2017, vol. 16, pp. 81–89. DOI: 10.1016/j.addma.2017.05.007.
5. Alvarez P., Montealegre M.Á., Pulido-Jiménez J.F., Arrizubieta J.I. Analysis of the process parameter influence in laser cladding of 316L stainless steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2018, vol. 2 (3), p. 55. DOI: 10.3390/jmmp2030055.
6. Pinkerton A.J. Lasers in additive manufacturing. *Optics & Laser Technology*, 2016, vol. 78, pp. 25–32. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.09.025.
7. Goodarzi D.M., Pekkarinen J., Salminen A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry. *Welding in the World*, 2017, vol. 61 (5), pp. 883–891. DOI: 10.1007/s40194-017-0495-0.
8. Dutta B. Directed Energy Deposition (DED) Technology. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*, 2022, vol. 3, pp. 66–84. DOI: 10.1016/B978-0-12-819726-4.00035-1.
9. Shah K., Izhar ul Haq, Khan A., Shah Sh.A., Khan M., Pinkerton A.J. Parametric study of development of Inconel-steel functionally graded materials by laser direct metal deposition. *Materials & Design*, 2014, vol. 54, pp. 531–538. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.08.079.
10. Carroll B.E., Otis R.A., Borgonia J.P., Suh J., Dillon R.P., Shapiro A.A., Hofmann D.C., Liu Z.-K., Beese A.M. Functionally graded material of 304L stainless steel and Inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling. *Acta Materialia*, 2016, vol. 108, pp. 46–54. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.02.019.
11. Wu D., Liang X., Li Q., Jiang L. Laser rapid manufacturing of stainless steel 316L/Inconel718 functionally graded materials: microstructure evolution and mechanical properties. *International Journal of Optics*, 2010, vol. 2010, p. 802385. DOI: 10.1155/2010/802385.
12. Chen B., Su Y., Xie Zh., Tan C., Feng J. Development and characterization of 316L/Inconel 625 functionally graded material fabricated by laser direct metal deposition. *Optics & Laser Technology*, 2020, vol. 123, p. 105916. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105916.
13. Mei X., Wang X., Peng Y., Gu H., Zhong G., Sh Y. Interfacial characterization and mechanical properties of 316L stainless steel/inconel 718 manufactured by selective laser melting. *Material Science and Engineering: A*, 2019, vol. 758, pp. 185–191. DOI: 10.1016/j.msea.2019.05.011.
14. El Cheikh H., Courant B., Branchu S., Hascoët J.-Y., Guillén R. Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process. *Optics and Laser in Engineering*, 2012, vol. 50 (3), pp. 413–422. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2011.10.014.
15. Zhao Y., Guan Ch., Chen L., Sun J., Yu T. Effect of process parameters on the cladding track geometry fabricated by laser cladding. *Optik*, 2020, vol. 223, p. 165447. DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.165447.
16. Saboori A., Piscopo G., Lai M., Salmi A., Biamino S. An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 780, p. 39179. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139179.
17. Balit Y., Joly L.-R., Szmytka F., Durbecq S., Charkaluk E., Constantinescu A. Self-heating behavior during cyclic loadings of 316L stainless steel specimens manufactured or repaired by Directed Energy Deposition. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 786, p. 139476. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139476.
18. Margerit P., Weisz-Patrault D., Ravi-Chandar K., Constantinescu A. Tensile and ductile fracture properties of as-printed 316L stainless steel thin walls obtained by directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 37, p. 101664. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101664.
19. Azinpour E., Darabi R., Sa J.C. de, Santos A., Hodek J., Dzigan J. Fracture analysis in directed energy deposition (DED) manufactured 316L stainless steel using a phase-field approach. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2020, vol. 177, p. 103417. DOI: 10.1016/j.finel.2020.103417.
20. Feenstra D.R., Cruz V., Gao X., Molotnikov A., Birbilis N. Effect of build height on the properties of large format stainless steel 316L fabricated via directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 34, p. 101205. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101205.
21. Hwa Y., Kumai Ch.S., Devine Th.M., Yang N., Yee J.K., Hardwick R., Burgmann K. Microstructural banding of directed energy deposition-additively manufactured 316L stainless steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 69, pp. 96–105. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.08.022.
22. Tan Zh.E., Lye Pang J.H., Kaminski J., Pepin H. Characterisation of porosity, density, and microstructure of directed energy deposited stainless steel AISI 316L. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 25, pp. 286–296. DOI: 10.1016/j.addma.2018.11.014.

23. Mukherjee M. Effect of build geometry and orientation on microstructure and properties of additively manufactured 316L stainless steel by laser metal deposition. *Materialia*, 2019, vol. 7, p. 100359. DOI: 10.1016/j.mtla.2019.100359.
24. Dutta B., Babu S., Jared B.H. *Science, technology and applications of metals in additive manufacturing*. Elsevier, 2019. 343 p. ISBN 978-0-12-816634-5. DOI: 10.1016/C2017-0-04707-9.
25. Taran V.D., ed. *Spravochnik po spetsial'nym rabotam: svarochnye raboty v stroitel'stve*. V 2 ch. Ch. 1 [Handbook of Special Works: Welding work in construction. In 2 pt. Pt. 2]. 2nd ed. Moscow, Stroiizdat Publ., 1971. 415 p.
26. Zavalov Yu.N., Dubrov A.V., Rodin P.S., Antonov A.N., Makarova E.S., Stenkin S.V., Dubrov V.D. [The influence of technological parameters on productivity in the manufacture of metal parts using direct laser growing]. *Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee* [Additive technologies: the present and the future]. Materials of V International conference. Moscow, VIAM Publ., 2019, pp. 121–130. (In Russian).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).