

УДК 621.792.3 : 621.77.04

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ
ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖ-159 (ХН58МБЮ)**

© 2023 Р.Р. Кяримов, В.Г. Смелов, В.П. Алексеев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 16.06.2023

В данной работе представлены результаты определения оптимальных параметров селективного лазерного сплавления (СЛС) металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ-159 (ХН58МБЮ). Опытным путем и с применением математических методов планирования и анализа экспериментов по определению влияния технологических параметров сплавления на предел прочности материала, установлены рациональные режимы СЛС, а именно, мощность лазерного излучения, шаг сканирования, скорость сканирования. Мощность лазерного излучения $P (X_1)$ и скорость сканирования $v (X_2)$ были выбраны в качестве основных варьируемых параметров полнофакторного плана эксперимента, а предел прочности σ_B , МПа (Y), был представлен в качестве зависимой переменной от выбранных факторов. Были определены механические свойства образцов, изготовленные СЛС, зависящие также от объемной плотности энергии, равной отношением лазерной мощности к произведению скорости, шага сканирования и толщины слоя. При проведении эксперимента удалось получить приемлемый показатель качества – механические свойства, для определенного диапазона технологических параметров СЛС. Проведено исследование микроструктуры материала сплавленных образцов жаропрочного сплава ВЖ-159 (ХН58МБЮ), проведены химический и гранулометрический анализ исходного порошка.

Ключевые слова: Селективное лазерное сплавление, аддитивное производство, план эксперимента, ВЖ-159, химический состав, предел прочности

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-36-46

EDN: PHAWDH

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме: «Организация высокотехнологичного производства индустриальных ГТД с интеллектуальной системой конструкторско-технологической подготовки для повышения функциональных характеристик» (Соглашение о предоставлении гранта № 075-11-2021-042 от 24.06.2021 г.)

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день аддитивное производство (АП) стало широко использоваться для авиационной промышленности. Это направление признано приоритетным в области развития материалов и технологий во всем мире [1,2]. Технологии аддитивного производства создают трехмерные физические объекты из цифровой информации с помощью специальной техники нанесения металла на предыдущий слой [3-7]. АП определяется как «процесс соединения материалов для изготовления деталей из данных 3D-модели, обычно слой за слоем, в отличие от методологий субтрактив-

ного производства и формообразующего производства» по стандартам ASTM и ISO [6]. Технология АП металлопорошковых композиций содержит несколько параметров обработки (переменных), что затрудняет их соотношение с желаемыми свойствами и характеристиками качества при их оптимизации. Каждый процесс аддитивного производства имеет свой собственный набор технологических параметров, которые в сочетании со свойствами материала и условиями окружающей среды влияют на качество изготовленных деталей. Способность АП изготавливать конструкции произвольной формы делает его очень подходящим для аэрокосмической промышленности. Среди различных аддитивных технологий селективное лазерное сплавление (СЛС) обеспечивает высочайшую точность при формировании деталей желаемой формы. Основные параметры, которые обычно варьируются, включают толщину слоя (t), скорость сканирования (v), мощность лазера (P) и шаг штри-

Кяримов Рустам Равильевич, аспирант.

E-mail: rustam9395@mail.ru

Смелов Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент, директор ИДЭУ.

E-mail: pdla_smelov@mail.ru

Алексеев Вячеслав Петрович, старший преподаватель.

E-mail: alexeev_v.p@mail.ru

ховки (h) [8]. Корреляции между параметрами обработки СЛС и различными свойствами изготовленных деталей, такими как поведение при растяжении [9], качество поверхности [10], механические характеристики [11] и усталостные свойства [12], были предметом различных исследований. В литературе можно найти многочисленные исследования по применению методов планирования экспериментов (например, полнофакторный полуфакторный план, центральный составной план и т.д.) и дисперсионного анализа для определения параметров и комбинаций параметров, которые влияют на типы свойств ответственных деталей. Полный факторный метод состоит из равного количества повторов для всех возможных комбинаций уровней (значений) каждого из параметров обработки. Преимущество этого метода в том, что он обеспечивает точную реакцию на эффекты параметров и все комбинации их взаимодействий [13]. Целью проведенных исследований явилось определение оптимальных режимов селективного лазерного сплавления для получения образцов из металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ-159 (ХН58МБЮ), и исследование механических и определение прочностных свойств образцов полученных СЛС.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для определения оптимальных режимов СЛС материала ВЖ-159 (ХН58МБЮ) проведен химический анализ металлопорошковой композиции на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA LMN с катодом LaB6 (РЭМ) и системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа (Oxford Instruments Advanced AZtec Energy). Изготовление образцов производилось на аддитивной установке SLM 280HL производства компании SLM Solutions. Исследование механических свойств образцов производилось на установке ИП 5113-100-11. Металлографические исследования проводились на оптическом металлографическом микроскопе Метам ЛВ-32 со встроенной телевизионной камерой. Подготовка шлифов осуществлялась абразивным методом в 3 перехода с использование шлифовально-полировального станка Metkon GRIPO 1V.

Для формирования плана эксперимента был использован полный факторный эксперимент [14], позволяющий получить математическую модель исследуемого объекта в виде уравнения множественной регрессии:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n b_k x_i x_k, \quad (1)$$

где b_0 – свободный член;

b_i, b_{ik}, b_{ik} – коэффициенты уравнения множественной регрессии;

x_i, x_k – значения факторов эксперимента.

Оценка точности эксперимента при каждом сочетании факторов проводится с выполнением нескольких экспериментов, в результате получая несколько значений Y_i исследуемого параметра, для которых находится среднее значение:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^K Y_i}{K}, \quad (2)$$

где K – количество повторных экспериментов.

В случае если дисперсия выходного параметра Y_i однородна в каждой точке факторного пространства, то опыт считается воспроизводимым. Для этого в каждой серии параллельных опытов вычисляется оценка дисперсии:

$$S_{Y_i}^2 = \frac{\sum_{i=1}^K (Y_i - \bar{Y})^2}{K - 1}. \quad (3)$$

Проверка однородности рядов построчных дисперсий проводится при помощи расчета величины критерия Кохрена, по следующей формуле:

$$G^{\text{оан}} = \frac{S_{Y_{\text{max}}}^2}{\sum_{i=1}^K S_{Y_i}^2}. \quad (4)$$

Полученное значение критерия Кохрена сравнивают со значением G – критерия взятого из таблицы критических значений в зависимости от уровня значимости α , числа степеней свободы $f = K - 1$ и числа опытов N . Если $G^{\text{расч}} < G^{\text{табл}}$ гипотеза об однородности дисперсий принимается, в противном случае – отвергается, и тогда эксперимент необходимо повторить, изменив условия его проведения (набор факторов, интервал их варьирования, точность измерительных приборов и др.). Дисперсия всего опыта определяется по формуле [14]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{Y_i}^2}{N}. \quad (5)$$

Чтобы связать значения факторов в кодированном масштабе с их значениями в натуральном масштабе проводится кодирование значений факторов. Для этого находят координаты центра плана по следующей формуле:

$$X_i^0 = \frac{X_{i \text{max}} + X_{i \text{min}}}{2}. \quad (6)$$

Интервалы варьирования вычисляют по следующей формуле:

$$\Delta X_i = \frac{X_{i \text{max}} - X_{i \text{min}}}{2}. \quad (7)$$

Оценки коэффициентов уравнения регрессии рассчитываются по методу наименьших квадратов. Используя предварительное проделанное кодирование переменных, расчет коэффициентов регрессии превращается в простую арифметическую задачу (N – число опытов):

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_0 Y_j; \quad (8)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_1 Y_j; \quad (9)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_2 Y_j; \quad (10)$$

$$b_{12} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_1 X_2 Y_j; \quad (11)$$

Далее определяется расчетное значение отклика с помощью полученного уравнения регрессии (1) и вычисленных коэффициентов. Все значения X_i в данном уравнении представлены в кодовом масштабе, поэтому их необходимо использовать с учетом знаков из матрицы планирования. В случае равномерного дублирования опытов, для проверки гипотезы об адекватности математической модели рассчитывается дисперсия неадекватности:

$$S_{неад}^2 = \frac{\sum (Y_{i\text{расч}} - Y_{i\text{эксп}})^2}{f_2}, \quad (12)$$

где f_2 – число степеней свободы определяется по формуле:

$$f_2 = N - L, \quad (13)$$

где L – число значимых коэффициентов исследуемого уравнения регрессии, включая b_0

Гипотезу об адекватности модели (1) проверяют по F – критерию Фишера:

$$F_{f_2 f_1}^{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2}, \quad (14)$$

где f_1 – число опытов.

В зависимости от уровня значимости α выбирают табличное значение F – критерия. Гипотеза об адекватности не отвергается при заданном значении уровня значимости, если выполняется условие: $F^{расч} < F^{табл}$ [14].

Декодировав уравнение регрессии, выводится следующее соотношение:

$$Y = b_0 + b_1 \left(\frac{X_1 - X_1^0}{\Delta X_1} \right) + b_2 \left(\frac{X_2 - X_2^0}{\Delta X_2} \right) + b_{12} \left(\frac{X_1 - X_1^0}{\Delta X_1} \right) \left(\frac{X_2 - X_2^0}{\Delta X_2} \right). \quad (15)$$

2. МАТЕРИАЛЫ И ПЛАН ЭКСПЕРИМЕНТА

Всего было исследовано 27 плоских образцов размерами 2 мм x 15 мм x 70 мм, изготовленных методом селективного лазерного сплавления (СЛС), на установке Selective Laser Melting System 280 HL (SLM Solutions GmbH, Любек, Германия) из порошка ВЖ-159 (ХН58МБЮ) на 9 режимах (по три образца на каждый режим) (рис. 1).

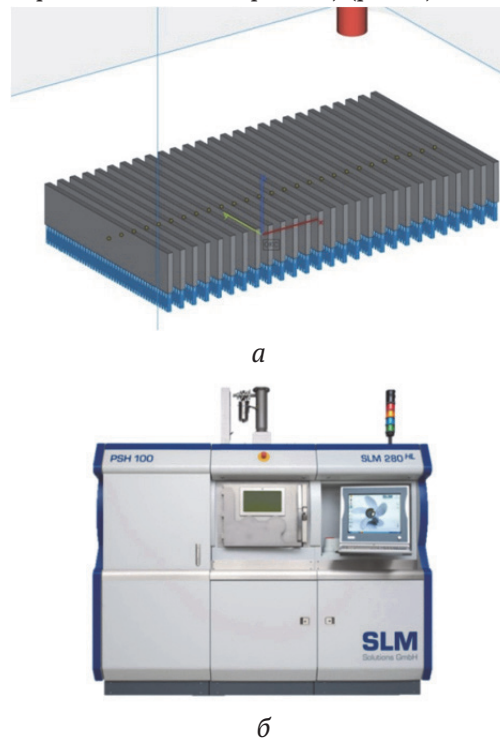


Рис. 1. Образцы из жаропрочного сплава ВЖ-159 (ХН58МБЮ) (а) и установка селективного лазерного плавления SLM 280 HL (б)

Химический состав порошка приведен в табл. 1. Использовался план 3^2 в полно-факторном эксперименте (два фактора варьировались на трех уровнях) Два параметра в ходе эксперимента изменялись: скорость сканирования (v) и мощность лазера (P) на трех уровнях изменения, а толщина слоя (t) и шаг сканирования (h) лазера на одном уровне. Эти технологические параметры являлись ключевыми параметрами, влияющими на качественные характеристики. Значения технологических режимов СЛС приведены в табл. 2.

Мощность лазерного излучения P (X_1) и скорость сканирования v (X_2) были выбраны в качестве варьируемых параметров. Изготовление образцов осуществлялось при толщине слоя 0,05 мм. Предел прочности σ_B , МПа (Y), представлен в качестве зависимой переменной. В табл. 4 представлена в кодовом и натуральном масштабах матрица полнофакторного эксперимента, а также результаты определения предела прочности образцов во всех, трижды повторенных 9

Таблица 1. Химический состав хромо-никелевого сплава ВЖ-159 (ХН58МБЮ) в процентном соотношении %

Ni	Cr	Al	Mo	Si	Mn	Fe	P	S	C	Nb	N	O
59,68	26,7	1,52	7,2	0,75	0,22	0,76	0,004	0,004	0,056	2,9	0,19	0,013

Таблица 2. Технологические режимы СЛС

№ образца	Мощность P, Вт	Скорость сканирования v, мм/с	Шаг сканирования h, мм	Толщина слоя t, мм	Плотность энергии E, Дж/мм ³
1-1	250	600	0,12	0,05	69,4
1-2					
1-3					
2-1		700			
2-2					
2-3					
3-1		800			
3-2					
3-3					
4-1	300	600	0,12	0,05	83,3
4-2					
4-3					
5-1		700			
5-2					
5-3					
6-1		800			
6-2					
6-2					
7-1	350	600	0,12	0,05	97,2
7-2					
7-3					
8-1		700			
8-2					
8-3					
9-1		800			
9-2					
9-3					

опытах. Для каждой серии параллельных опытов в табл. 5 представлены результаты оценки дисперсии.

При помощи расчета величины критерия Кохрена, была проведена проверка однородности рядов построчных дисперсий, по формуле (4) $G_{расч} = 0,350$. Сравнение полученного значения Кохрена проводилось со значением G – критерия взятом из таблицы [14], поскольку $G_{расч} < G_{табл}$, гипотеза однородности дисперсии не отвергается. Дисперсия всего опыта была определена по формуле (5) $S_y^2 = 741,99$.

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитаны по формулам 8,9,10,11:

$$b_0 = (1198,1+1181,4+ 1194,8+1178,4+1147,7+ +1156,6+1134,4+1096,4+1056,8) / 9 = 1149,4. \quad (16)$$

$$b_1 = \frac{-1198,1-1194,8+1134,4+1056,8}{9} = 22,42; \quad (17)$$

$$b_2 = \frac{-1198,1+1194,8-1134,4+1056,8}{9} = 8,98; \quad (18)$$

$$b_{12} = \frac{1198,1-1194,8-1134,4+1056,8}{9} = 8,24. \quad (19)$$

Таблица 3. Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Кодовый масштаб		Натуральный масштаб		Параллельные опыты			$\langle Y \rangle \sigma_B$, МПа
	X_1	X_2	P , Вт	v , мм/с	Y_1	Y_2	Y_3	
1	-1	-1	250	600	1186,6	1213,1	1194,5	1198,1
2	-1	0	250	700	1184,6	1105,2	1254,3	1181,4
3	-1	1	250	800	1193,5	1193,5	1197,4	1194,8
4	0	-1	300	600	1191,5	1166,9	1176,8	1178,4
5	0	0	300	700	1143,5	1156,2	1143,5	1147,7
6	0	1	300	800	1152,3	1152,3	1165,1	1156,6
7	1	-1	350	600	1144,4	1118,9	1139,5	1134,3
8	1	0	350	700	1100,3	1103,3	1085,6	1096,4
9	1	1	350	800	1040,5	1051,3	1078,7	1056,8

Таблица 4. Оценка дисперсии для каждой серии параллельных опытов

№ опыта	S^2_{Y1}	S^2_{Y2}	S^2_{Y3}	$\sum S^2_{Yi}$
1	66,125	112,5	6,48	185,105
2	5,12	2903,22	2657,205	5565,545
3	0,845	0,845	3,38	5,07
4	85,805	66,125	1,28	153,21
5	8,82	36,125	8,82	53,765
6	9,245	9,245	36,125	54,615
7	51,005	118,58	13,52	183,105
8	7,605	23,805	58,32	89,73
9	132,845	15,125	239,805	387,775
Σ	367,415	3285,57	3024,935	6677,92

Подставляя значения коэффициентов в уравнение 15 получено уравнение регрессии:

$$\sigma_B = 1149,4 + 22,24_1 \left(\frac{X_1 - X_1^0}{\Delta X_1} \right) + 8,98 \left(\frac{X_2 - X_2^0}{\Delta X_2} \right) + 8,24 \left(\frac{X_1 - X_1^0}{\Delta X_1} \right) \left(\frac{X_2 - X_2^0}{\Delta X_2} \right). \quad (20)$$

Далее при помощи полученного уравнения регрессии были рассчитаны значения отклика. По формуле (21) были определены коэффициенты вариации, отношение стандартного отклонения σ к среднему μ :

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu}. \quad (21)$$

Экспериментальные и расчетные значения коэффициентов вариации c_v предела прочности σ_B представлены в табл. 5. Наименьшее отклонение значений предела прочности выявлено у режима № 4, наибольшее у режима №9.

Дисперсия неадекватности рассчитывалась по формуле (12): $S^2_{неад} = 3052,5$. Значение критерия Фишера рассчитывалось по формуле (14): $F_{расч} = 0,24$. Табличное значение F – критерия $F_{табл} = 0,307$. Поскольку $F_{расч} < F_{табл}$, гипотеза об адекватности модели не отвергается.

Таблица 5. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

№ опыта	σ_B эксп.	σ_B расч.	$\Delta \sigma_B$	$\Delta \sigma_B^2$	c_v	отклонение в %
1	1198,1	1126,2	71,9	5164,82	0,062	6,2
2	1181,4	1144,2	37,2	1384,67	0,032	3,2
3	1194,8	1127,7	67,1	4502,41	0,058	5,8
4	1178,4	1171,1	7,3	53,6149	0,0062	0,6
5	1147,7	1189,03	41,3	1708,44	0,035	3,5
6	1156,6	1189,03	32,4	1051,92	0,028	2,8
7	1134,3	1154,6	20,3	411,639	0,018	1,8
8	1096,4	1189,03	92,6	8580,93	0,081	8,1
9	1056,8	1189,03	132,2	17485,7	0,12	11,8

3. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МИКРОАНАЛИЗ СТРУКТУРЫ

Механические свойства изготовленных образцов определялись в поперечном направлении относительно роста при селективном лазерном сплавлении. Испытания проводились при 20°C на установке ИР 5113-100-11 в соответствии с ГОСТ 11701-84 на стандартных образцах длиной 48 мм, шириной рабочей части 3 мм и толщиной 2 мм, с незначительно заполированной поверхностью образцов. Результаты испытаний, а также вид и размеры дефектов, обнаруженных в материале образцов, приведены в табл. 6. Внешний вид образца представлен на рис. 2.

В изломах образцов всех вариантов присутствовали мелкие дефекты типа пор, в образцах режимов № 6-9 зафиксированы и небольшие непролавы (рис. 3). Максимальный стабильный уровень свойств получен на образцах № 1. С увеличением мощности лазерного излучения при СЛС наблюдалось снижение прочностных характеристик. Существенного влияния скорости сканирования при СЛС на предел прочности образцов не выявлено.

Существенный разброс значений предела текучести в пределах одного режима СЛС был замечен на образцах, изготовленных по режимам № 2, 3, 4, 6, 7, например, на образцах режима № 2 – от 651,2 МПа до 1088,5 МПа. Наименьший уровень относительного удлинения зафиксирован на образцах режима № 2 ($\delta_{cp} \sim 13,9\%$), максимальный уровень был замечен на образцах режима № 7 ($\delta_{cp} \sim 19,8\%$), на образцах остальных режимов относительное удлинение составило $\delta_{cp} \sim 16...17\%$.

Микроанализ структуры образцов проводился на инвертированном микроскопе Axio Vert.A1 на шлифах, изготовленных вдоль направления роста при СЛС по всей ширине образцов на расстоянии примерно 10...15 мм от торца. Травление шлифов осуществлялось электролитическим способом при комнатной температуре в течение 7...10 секунд в электролите. При микроанализе выявлена разная морфология трековой структуры материала образцов. У образцов режимов № 1...4 структура материала была однородной, представляла собой «рыбью чешую», в материале образцов режима № 5 на локальных участках обнаружены удлиненные

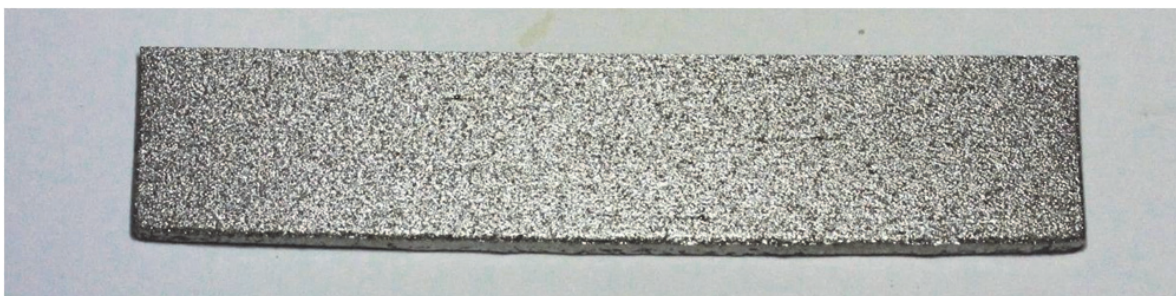


Рис. 2. Внешний вид образца изготовленного СЛС

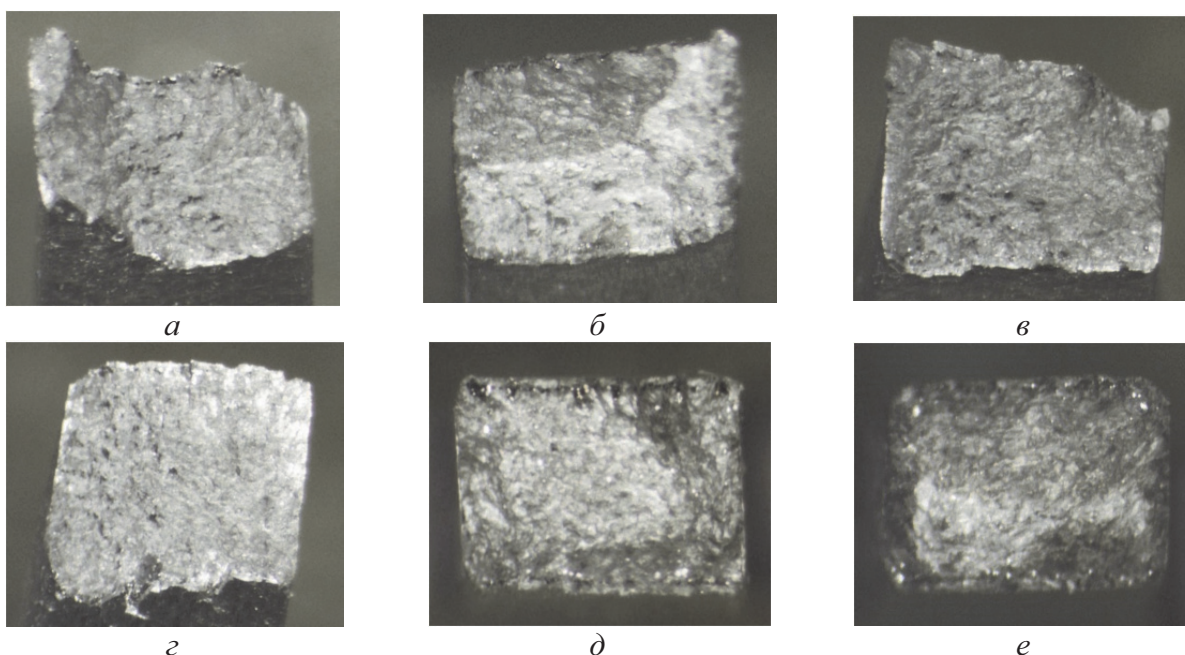


Рис. 3. Изломы образцов после испытаний:

а – образец № 1-2; б – образец № 2-1; в – образец № 2-2; г – образец № 2-3; д – образец № 3-1; е – образец № 4-1

Таблица 6. Результаты механических испытаний образцов изготовленных СЛС

№ режима/образца	σ_B , МПа	σ_B , МПа среднее	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа среднее	δ , %	δ , % среднее	Вид и размер дефектов в материале образцов, мкм	
1	1-1	1186,6	1198,1	965,9	1041,1	18,6	16,7	Поры диаметром до 30 мкм, единичные до 50 мкм
	1-2	1213,1		1083,6		15,6		
	1-3	1194,5		1073,8		16,0		
2	2-1	1184,6	1181,4	983,6	907,8	13,4	13,9	Поры диаметром до 36 мкм, единичные до 64 мкм
	2-2	1105,2		651,2		13,2		
	2-3	1254,3		1088,5		15,2		
3	3-1	1193,5	1194,8	1010,1	782,3	16,8	16,1	Единичные поры диаметром до 24 мкм
	3-2	1193,5		640,4		16,1		
	3-3	1197,4		696,3		15,3		
4	4-1	1191,5	1178,4	690,4	769,2	16,5	19,5	Поры диаметром до 40 мкм, единичные до 50 мкм
	4-2	1166,9		991,5		20,5		
	4-3	1176,8		625,7		21,4		
5	5-1	1143,5	1147,7	642,3	645,6	15,3	15,6	Поры диаметром до 30 мкм, единичные до 56 мкм. Трещины от боковых непролагов длиной до 50 мкм
	5-2	1156,2		669,8		17,1		
	5-3	1143,5		624,7		14,5		
6	6-1	1152,3	1156,6	990,5	744,7	15,9	17,8	Поры диаметром до 46 мкм, единичные до 75 мкм. Единичные непролавы размером до 152x327 мкм
	6-2	1152,3		627,6		19,9		
	6-3	1165,1		615,9		17,6		
7	7-1	1144,4	1134,3	890,4	718,2	19,3	19,8	Поры диаметром до 25 мкм, строчка непролагов длиной~1075 мкм, непролавы размером до 52x362 мкм и микронпролавы длиной до 46 мкм
	7-2	1118,9		628,6		19,5		
	7-3	1139,5		635,5		20,5		
8	8-1	1100,3	1096,4	617,8	603,4	17,5	17,3	Поры диаметром до 20 мкм, непролав у боковой поверхности размером 70x80 мкм, микронпролавы длиной до 48 мкм
	8-2	1103,3		588,4		16,4		
	8-3	1085,6		604,1		18,0		
9	9-1	1040,5	1056,8	605,1	589,7	11,5	14,1	Поры диаметром до 10 мкм, непролавы размером до 45x50 мкм, 30x40 мкм и микронпролавы длиной до 80 мкм
	9-2	1051,3		585,5		15,0		
	9-3	1078,7		578,6		15,9		
Мин.	1040,5	1134,3	578,6	589,7	11,5	13,9	-	
Макс.	1254,3	1198,1	1088,5	1041,1	21,4	19,8	-	

зерна, у образцов режимов № 6 и 7 в материале замечено чередование зон с разной шириной треков. Структура материала образцов режима

№ 8 и 9 показала практически однородную поверхность с широкими вытянутыми треками и локальными участками более округлых узких

треков (рис. 4). В материале образцов режима № 5 обнаружены трещины, распространившиеся от боковых непроплавов длиной до 0,05 мкм, на режимах № 6, 7, 8, 9 были замечены единичные непроплавы.

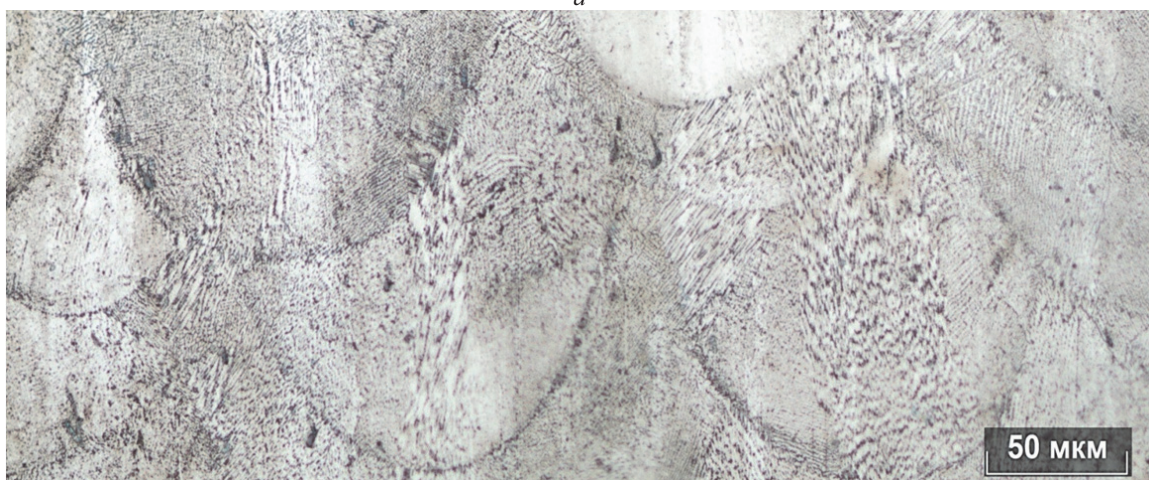
4. ВЫВОДЫ

При исследовании металлического порошка жаропрочного сплава ВЖ-159 (ХН58МБЮ) установлено, что материал обладает правильной сферической формой с небольшим коли-

чеством дефектных гранул. В качестве характерных дефектов порошка можно выделить сателлиты и незначительное количество слипшихся частиц – конгломератов, средний размер которых составляет 60 мкм. Микроанализ выявил разную морфологию трековой структуры материала образцов. Структура материала образцов режимов № 1...4 однородна и обладала формой «рыбья чешуя», у образцов режима № 5 на локальных участках обнаружены удлиненные зерна, на образцах режимов № 6 и 7 замечено чередование зон с разной шириной



а



б



в

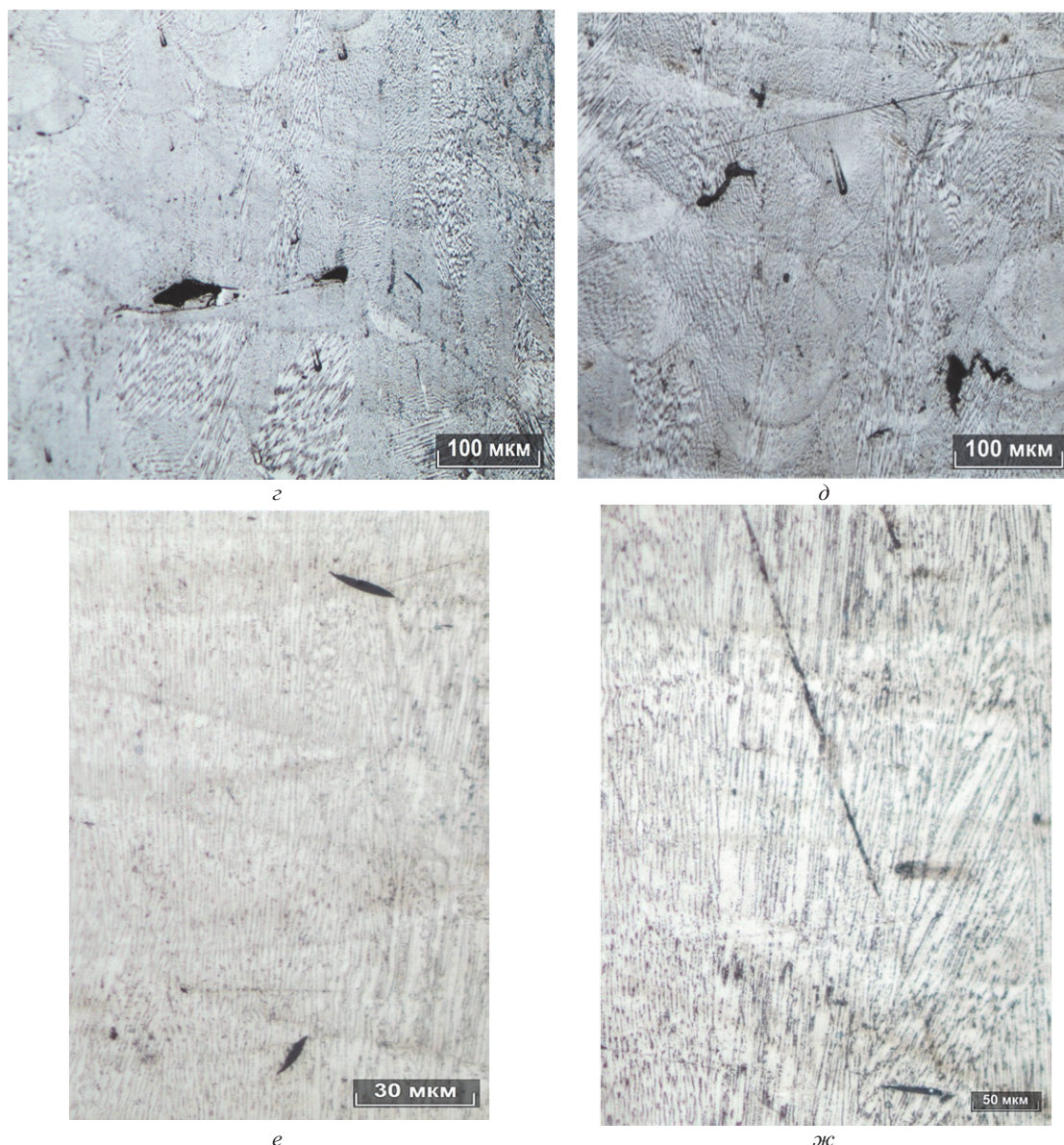


Рис. 4. Микроструктура и дефекты, обнаруженные в материале образцов:

а – образец № 1-2, увеличение X 100; б – образец № 3-3, увеличение X 500; в – образец № 5-3, увеличение X 200; г – образец № 6-1, увеличение X 200; д – образец № 6-2, увеличение X 200; е – образец № 8-2, увеличение X 500; ж – образец № 8-3, увеличение X 200

треков. Образцы режимов сплавления № 8 и 9 обладали практически однородной структурой материала с широкими вытянутыми треками, в локальных участках присутствовали более округлые узкие треки.

Максимальный и стабильный уровень механических свойств получен на образцах режима № 1. С увеличением мощности лазерного излучения при СЛС наблюдалось снижение прочностных характеристик. Существенного влияния скорости сканирования при СЛС на предел прочности образцов не выявлено. В материале образцов всех вариантов присутствовали единичные поры диаметром до 0,070 мм.

Примененный метод полного факторного эксперимента по определению технологических параметров СЛС для материала ВЖ-159

(ХН58МБЮ) позволил подобрать оптимальные режимы сплавления. Экспериментальные и расчетные значения коэффициентов вариации предела прочности c_v , выявили наименьшее отклонение у режима № 4, наибольшее у режима № 9. Приемлемые параметры СЛС можно считать следующие значения: мощность лазера $P = 300$ Вт, скорость сканирования $v = 600$ мм/с шаг сканирования $h = 0,12$ мм, при объемной плотности энергии сплавления $E = 83,3$ Дж/мм³. Однако оптимальными значениями СЛС являются: мощность лазера $P = 250$ Вт, шаг сканирования $h = 0,12$ мм, скорость сканирования $v = 600$ мм/с, при объемной плотности энергии сплавления $E = 69,44$ Дж/мм³, которые согласно данным табл. 6 обеспечивают наилучшие механические свойства и качественную микроструктуру образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов, Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи / Е.Н. Каблов // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС-ВИАМ, 2002. – С. 23–47.
2. Каблов, Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России / Е.Н. Каблов. – М.: ВИАМ, 2015. – 557 с.
3. J.C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar, 2 – Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. In Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, F. Froes, R. Boyer, Eds., Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019, pp. 7–31. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128140628000029> (accessed on 10 September 2022).
4. J. Vora, H. Parmar, R. Chaudhari, S. Khanna, M. Doshi, V. Patel, Experimental investigations on mechanical properties of multi-layered structure fabricated by GMAW-based WAAM of SS316L. J. Mater. Res. Technol. 2022, 20, 2748–2757. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422013072> (accessed on 10 September 2022).
5. Z. Chen, Understanding of the Modeling Method in Additive Manufacturing. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020, 711, 012017.
6. International Organization for Standardization. Additive manufacturing – General principles – Terminology. ISO/ASTM 52900. 2018. Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:dis:ed-2:v1:en> (accessed on 10 September 2022).
7. Wang, D.; Liu, L.; Deng, G.; Deng, C.; Bai, Y.; Yang, Y.; Wu, W.; Chen, J.; Liu, Y.; Wang, Y.; et al. Recent progress on additive manufacturing of multi-material structures with laser powder bed fusion. Virtual Phys. Prototyp. 2022, 17, 329–365.
8. Yap, C.Y.; Chua, C.K.; Dong, Z.L.; Liu, Z.H.; Zhang, D.Q.; Loh, L.E.; Sing, S.L. Review of selective laser melting: Materials and applications. Appl. Phys. Rev. 2015, 2, 041101.
9. Qiu, C.; Al Kindi, M.; Aladawi, A.S.; Al Hatmi, I. A Comprehensive Study on Microstructure and Tensile Behavior of a Selectively Laser Melted Stainless Steel. Sci. Rep. 2018, 8, 1–16.
10. Charles, A.; Elkaseer, A.; Thijs, L.; Hagenmeyer, V.; Scholz, S.G. Effect of Process Parameters on the Generated Surface Roughness of Down-Facing Surfaces in Selective Laser Melting. Appl. Sci. 2019, 9, 1256.
11. Perevoshchikova, N.; Rigaud, J.; Sha, Y.; Heilmaier, M.; Fennin, B.; Labelle, E.; Wu, X. Optimisation of Selective Laser Melting Parameters for the Ni-Based Superalloy IN-738 LC Using Doehlert's Design. Rapid Prototyp. J. 2017, 23, 881–892.
12. Zhou, Y.; Abbara, E.; Jiang, D.; Azizi, A.; Poliks, M.D.; Ning, F. High-cycle fatigue properties of curved-surface AlSi10Mg parts fabricated by powder bed fusion additive manufacturing. Rapid Prototyp. J. 2022, 28, 7.
13. Giri, N.C.; Das, M.N. Design and Analysis of Experiments; Wiley: New Delhi, India, 1986.
14. Агаповичев, А.В. Применение современных математических методов планирования и анализа экспериментов при решении задач оптимизации режимов СЛС: методические указания / А.В. Агаповичев, В.Г. Смелов, А.В. Сотов. – Самара: Самарский университет, 2016. – 26 с.

STUDY OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SAMPLES PRODUCED BY THE METHOD OF SELECTIVE LASER MELTING FROM METALLIC POWDER OF HEAT-RESISTANT ALLOY VZh-159 (KhN58MBYu)

© 2023 R.R. Kyarimov, V.G. Smelov, V.P. Alekseev

Samara National Research University, Samara, Russia

This paper presents the results of determining the optimal parameters of selective laser melting (SLM) of the metal powder of the high-temperature alloy VZh-159 (KhN58MBYu). Empirically and using mathematical methods for planning and analyzing experiments to determine the effect of technological parameters of fusion on the tensile strength of the material, rational SLM modes have been established, namely, laser emission power, hatching, scanning speed. The laser power P (X1) and scanning speed v (X2) were chosen as the main variable parameters of the full-factor experimental design, and the tensile strength σ_B , MPa (Y), was presented as a dependent variable on the selected factors. The mechanical properties of the samples produced by the SLM were determined, which also depended on the volumetric energy density, which is equal to the ratio of the laser power to the product of the scanning speed, hatching, and layer thickness. During the experiment, it was possible to obtain an acceptable quality indicator – mechanical properties, for a certain range of technological parameters of SLM. A study of the microstructure of the material of produced samples of the VZh-159 (KhN58MBYu) heat-resistant alloy was carried out, and chemical and granulometric analysis of the initial powder was carried out.

Key words: Selective laser melting, additive manufacturing, experimental design techniques, VZh-159, chemical composition, tensile strength.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4-36-46

EDN: PHAWDH

REFERENCES

1. *Kablov, E.N.* Aviacionnoe materialovedenie v XXI veke. Perspektivy i zadachi / E.N. Kablov // Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy VIAM 1932–2002. M.: MISIS-VIAM, 2002. – С. 23–47
2. *Kablov, E.N.* Tendencii i orientiry innovacionnogo razvitiya Rossii / E.N. Kablov. – M.: VIAM, 2015. – 557 s.
3. *J.C. Najmon, S. Raeisi, A. Tovar, 2* – Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. In Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, F. Froes, R. Boyer, Eds., Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019, pp. 7–31. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128140628000029> (accessed on 10 September 2022)
4. *J. Vora, H. Parmar, R. Chaudhari, S. Khanna, M. Doshi, V. Patel*, Experimental investigations on mechanical properties of multi-layered structure fabricated by GMAW-based WAAM of SS316L. *J. Mater. Res. Technol.* 2022, 20, 2748–2757. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422013072> (accessed on 10 September 2022)
5. *Z. Chen*, Understanding of the Modeling Method in Additive Manufacturing. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2020, 711, 012017
6. International Organization for Standardization. Additive manufacturing – General principles – Terminology. ISO/ASTM 52900. 2018. Available online: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:dis:ed-2:v1:en> (accessed on 10 September 2022)
7. *Wang, D.; Liu, L.; Deng, G.; Deng, C.; Bai, Y.; Yang, Y.; Wu, W.; Chen, J.; Liu, Y.; Wang, Y.; et al.* Recent progress on additive manufacturing of multi-material structures with laser powder bed fusion. *Virtual Phys. Prototyp.* 2022, 17, 329–365.
8. *Yap, C.Y.; Chua, C.K.; Dong, Z.L.; Liu, Z.H.; Zhang, D.Q.; Loh, L.E.; Sing, S.L.* Review of selective laser melting: Materials and applications. *Appl. Phys. Rev.* 2015, 2, 041101.
9. *Qiu, C.; Al Kindi, M.; Aladawi, A.S.; Al Hatmi, I.* A Comprehensive Study on Microstructure and Tensile Behavior of a Selectively Laser Melted Stainless Steel. *Sci. Rep.* 2018, 8, 1–16.
10. *Charles, A.; Elkaseer, A.; Thijs, L.; Hagenmeyer, V.; Scholz, S.G.* Effect of Process Parameters on the Generated Surface Roughness of Down-Facing Surfaces in Selective Laser Melting. *Appl. Sci.* 2019, 9, 1256.
11. *Perevoshchikova, N.; Rigaud, J.; Sha, Y.; Heilmaier, M.; Finnin, B.; Labelle, E.; Wu, X.* Optimisation of Selective Laser Melting Parameters for the Ni-Based Superalloy IN-738 LC Using Doehlert’s Design. *Rapid Prototyp. J.* 2017, 23, 881–892.
12. *Zhou, Y.; Abbara, E.; Jiang, D.; Azizi, A.; Poliks, M.D.; Ning, F.* High-cycle fatigue properties of curved-surface AlSi10Mg parts fabricated by powder bed fusion additive manufacturing. *Rapid Prototyp. J.* 2022, 28, 7.
13. *Giri, N.C.; Das, M.N.* Design and Analysis of Experiments; Wiley: New Delhi, India, 1986.
14. *Agapovichev, A.V.* Primenenie sovremennykh matematicheskikh metodov planirovaniya i analiza eksperimentov pri reshenii zadach optimizacii rezhimov SLS: metodicheskie ukazaniya / A.V. Agapovichev, V.G. Smelov, A.V. Sotov. – Samara: Samarskij universitet, 2016. – 26 s.

Rustam Kyarimov, Postgraduate Student.

E-mail: rustam9395@mail.ru

Vitaly Smelov, Ph.D., Associate Professor, Director of Institute of Engine and Power Plant Engineering.

E-mail: pdla_smelov@mail.ru

Vyacheslav Alekseev, Senior Lecturer.

E-mail: alexeev_v.p@mail.ru