

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА ДЕФЕКТЫ СТРОЕНИЯ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ТИПА ВКНА-4УР

О.А. Базылева¹

М.В. Унчикова²

Н.А. Головлев^{1,2}

А.Г. Евгенов¹

lab3@viam.ru

unchikova_mv@mail.ru

ozyar@mail.ru

viam.lab16@mail.ru

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследованы дефекты строения сплава типа ВКНА-4УР в зависимости от режимов селективного лазерного сплавления. Разработаны математические регрессионные модели, адекватно описывающие влияние мощности лазера, скорости сканирования и межтрекового расстояния на пористость и склонность к образованию трещин синтезированного сплава. Определены режимы обработки, позволяющие минимизировать число дефектов

Ключевые слова

Жаропрочный никелевый интерметаллидный сплав, аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, мощность лазера, межтрековое расстояние, скорость сканирования, пористость, микротрещины, дефекты структуры

Поступила в редакцию 23.03.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Создание современных конкурентоспособных авиационных двигателей с высоким уровнем оригинальных технических решений базируется на инновационных технологиях, применение которых увеличивает ресурс работы, повышает надежность и коэффициент использования материалов, снижает трудоемкость производства [1, 2]. Перспективные аддитивные технологии (АТ), основанные на послойном синтезе изделия сложной геометрической формы, решают задачу быстрого прототипирования, позволяют исключить трудоемкие промежуточные этапы проектирования и изготовления оснастки, улучшают экологические характеристики процесса, снижают продолжительность производственного цикла [3], и поэтому развитие АТ является одним из важнейших стратегических направлений авиационной промышленности на ближайшие десятилетия [4].

В настоящее время перспективной областью применения АТ является изготовление функциональных и силовых деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов, среди которых разработанные в ВИАМ интерметаллидные Ni₃Al-сплавы типа ВКНА (ВИН) имеют наиболее высокие рабочие температуры, заполняя нишу между литейными суперсплавами и жаропрочной керамикой. Сплавы ВКНА относятся к экономно-легированным и могут иметь поликристаллическую (равноосную), дендритную столбчатую (направленную) или монокристаллическую структуры. Методом компьютерного конструирования

определены оптимальные композиции указанных сплавов [5–7], разработаны технические условия на поставку и технологические рекомендации на изготовление фасонных литых деталей камеры сгорания и соплового аппарата. Эффективность применения сплавов ВКНА в современных и перспективных двигателях определяет актуальность разработки АТ производства деталей из интерметаллидных Ni₃Al-сплавов [8–10].

В России и за рубежом наиболее широко используемым методом АТ при изготовлении деталей является селективное лазерное сплавление (СЛС), позволяющее «построить» изделие любой сложности из металлических порошков широкой номенклатуры. Однако усадка металла при сплавлении порошка и напряжения, возникающие вследствие сверхбыстрого охлаждения трека из жидкого состояния и термоциклического воздействия лазера при сканировании поверхности, могут приводить к образованию пор и микротрещин [11]. Оптимизация технологического процесса СЛС позволяет существенно уменьшить число структурных дефектов.

Цель настоящей работы заключается в определении оптимального режима СЛС, обеспечивающего минимальное число дефектов в виде трещин и пор в структуре никелевого жаропрочного интерметаллидного сплава типа ВКНА-4УР.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 7.3: Создание интерметаллидных никелевых сплавов и композиционных материалов на их основе («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Методика проведения исследований. В качестве объекта исследования выбран интерметаллидный сплав ВКНА-4УР системы Ni-Al-Co-Cr-Mo-Ti-W-C-Zr, который разработан для поликристаллических отливок [12]. Металлический порошок из литой прутковой (шихтовой) заготовки, выплавленной в вакуумной индукционной печи ИСВ-035, получали методом атомизации в атмосфере аргона на установке HERMIGA 10/100VI. Рассев порошка осуществляли на промышленном виброгрохоте ConceptLaser QM Powder. Образцы из порошка гранулометрического состава 10... 50 мкм изготавливали на установке EOS M290 в среде аргона при подогреве платформы.

Сплавление проводили с использованием ленточной стратегии при изменении направления сканирования лазера по отношению к предыдущему слою (рис. 1).

Ввиду сложности и недостаточной изученности физико-химических процессов, протекающих при СЛС, влияние параметров синтеза на дефекты строения сплава ВКНА-4УР определяли с помощью анализа статистической математической модели, разработанной по результатам полнофакторного эксперимента типа 2ⁿ. В качестве независимых переменных X_i выбраны скорость сканиро-

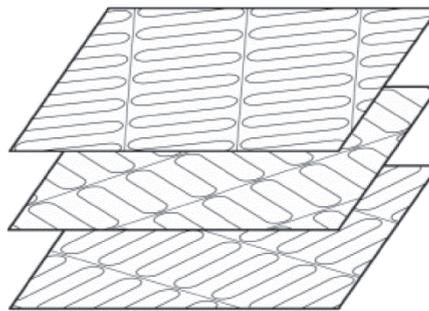


Рис. 1. Схема ленточной стратегии плавления

вания V (X_1), межтрековое расстояние L (X_2), мощность лазера P (X_3); в качестве функций отклика Y_u — объемные доли пор (Y_1) и несплошностей (Y_2). Значения факторов X_1 , X_2 , X_3 и уровни их варьирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения уровней и интервалов варьирования факторов

Уровень	$X_1(V)$	$X_2(L)$	$X_3(P)$
Основной (X_{i0})	a	b	c
Верхний ($X_{i\max}$)	$a + 100$	$b + 0,01$	$c + 20$
Нижний ($X_{i\min}$)	$a - 100$	$b - 0,01$	$c - 20$
Интервал варьирования (ΔX_i)	100	0,01	20

Коэффициенты a , b , c — условные единицы, обозначающие основной уровень X_{i0} . Кодированные значения параметров (x_i) определяли по следующей формуле: $x_i = (X_i - X_{i0}) / \Delta X_i$.

Матрица планирования экспериментов, отвечающая требованиям симметричности, нормирования и ортогональности, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования экспериментов

Номер опыта (образца)	x_1	x_2	x_3
1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1
4	-1	-1	+1
5	+1	+1	-1
6	-1	+1	-1
7	+1	-1	-1
8	-1	-1	-1

Было реализовано 8 опытов ($N = 8$), причем каждый проводили однократно. Для оценки дисперсии выполнен и трижды продублирован дополнительный эксперимент на основном уровне $x_1 = 0$, $x_2 = 0$, $x_3 = 0$ (образцы 9, 10, 11).

По результатам исследований построены математические модели в виде полиномиальных уравнений (1) первого порядка с учетом парных взаимодействий варьлируемых параметров x_i :

$$Y_u = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (1)$$

Значимость коэффициентов в уравнении регрессии (1) определяли путем сравнения с границами доверительных интервалов, проверка адекватности модели выполнена по критерию Фишера.

Для исследования микроструктуры после СЛС образцы обрабатывали на полировальной станции 25 Struers–Tegramin и подвергали травлению в реакти-

ве $\text{HCl-H}_2\text{SO}_3\text{-HNO}_3$. Структуру образцов исследовали на оптическом Olympus GX-51 и растровом электронном TESCAN VEGA II микроскопах.

Количество микропор определяли металлографическим методом на полированных нетравленных шлифах с помощью компьютерной программы ImageExpertPro 3x. На каждом образце при увеличении $\times 200$ анализировали 25 полей зрения с наибольшим числом пор.

Объемную долю несплошностей в зависимости от режима СЛС рассчитывали по значениям относительной плотности $\rho_{\text{отн}} = \rho_{\text{СЛС}} / \rho_{\text{теор}}$, где $\rho_{\text{СЛС}}$ и $\rho_{\text{теор}}$ — плотность синтезированного образца и теоретическая плотность соответственно. Значение $\rho_{\text{СЛС}}$ определяли методом гидростатического взвешивания по результатам двух измерений массы исследуемого образца в воздушной среде и спиртовом растворе с известной плотностью.

Результаты исследований и их обсуждение. Микроструктурные исследования показали, что все режимы СЛС обеспечивают необходимую глубину проплавления слоев порошка, а сами треки стабильны по геометрическим параметрам и не имеют разрывов по длине. Синтезированный сплав характеризуется слоистой структурой, образующейся при последовательном сплавлении треков в условиях разнонаправленного теплоотвода: вдоль треков (по мере перемещения пятна лазера) и нижележащие слои закристаллизовавшегося металла. Треки на поперечных образцах имеют вид сегментов с развитой субзеренной структурой (рис. 2, 3).



Рис. 2. Микроструктура образца 10 (поперечное сечение)

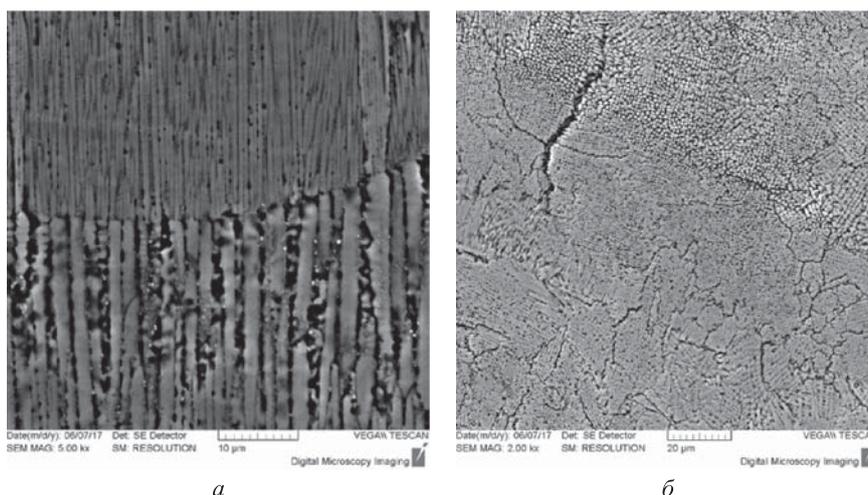


Рис. 3. Микроструктура образца 5:

a — поперечное сечение (граница слоев); *б* — продольное сечение

Проведенные исследования выявили дефекты строения в виде микротрещин (рис. 3, б) и пор и позволили оценить их число в зависимости от режимов СЛС (табл. 3, 4).

Таблица 3

**Результаты оценки пористости структуры
в зависимости от режима СЛС**

Функция отклика	Объемная доля пор, %, в образцах №							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Y_1	0,04	0,36	0,03	0,07	0,12	0,03	0,04	0,04

Таблица 4

**Результаты определения объемной доли несплошностей
в зависимости от режима СЛС**

Номер опыта (образца)	Масса образца, г		Объем, см ³	Плотность рслс, г/см ³	Объемная доля несплошностей, %
	на воздухе	в спиртовой смеси			
1	10,7048	9,4281	1,3691	7,8187	1,15
2	10,6206	9,3522	1,3602	7,8080	1,28
3	10,4803	9,2249	1,3462	7,7846	1,58
4	10,4428	9,2014	1,3312	7,8442	0,83
5	8,2341	7,2540	1,0510	7,8341	0,95
6	10,1887	8,9744	1,3021	7,8242	1,08
7	10,2897	9,0652	1,3131	7,8359	0,93
8	9,9815	8,7959	1,2714	7,8506	0,75

Приведенные данные показывают, что в исследуемых интервалах варьирования технологических факторов пористость изменяется в диапазоне 0,03...0,36 %, доля несплошностей — в диапазоне 0,75...1,58 %.

Значения коэффициентов регрессии b_{iu} для каждой функции (табл. 5) определяли по методике, изложенной в работе [13], и проверяли на статистическую значимость. Результаты расчета дисперсии S_{yu}^2 для каждой функции отклика Y_1, Y_2 приведены в табл. 6, 7. Поскольку опыты не дублировали, дисперсии оценок коэффициентов рассчитывали по формуле $S_{b_i}^2$, определяли среднеквадратическую ошибку S_{b_i} (табл. 8) и доверительный интервал коэффициентов регрессии $\Delta b_i = t_{\alpha, f} S_{b_i}$, где t — коэффициент Стьюдента в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы f .

Таблица 5

Коэффициенты регрессии для параметров оптимизации Y_1 и Y_2

Функции отклика	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{23}	b_{13}	b_{123}
Y_1	0,091	-0,033	0,046	0,033	-0,023	0,028	-0,056	-0,046
Y_2	1,073	0,0847	0,0480	0,1410	-0,150	-0,041	0,0698	-0,072

Таблица 6

Расчет дисперсии параметра оптимизации Y_1 (объемная доля пор)

Номер образца	Y_{1k} эксперимента	Y_1	ΔY_{1k}	ΔY_{1k}^2	$\Sigma \Delta Y_{1k}^2$	$S_{y_1}^2$
9	0,05	0,033	0,01666	0,000278	0,000467	0,00023
10	0,02		-0,0133	0,000178		
11	0,03		-0,0033	1,11E-05		

Таблица 7

Расчет отклонений функции отклика Y_2 (объемная доля несплошностей)

Номер образца	Y_{2k} эксперимента	Y_2	ΔY_{2k}	ΔY_{2k}^2	$\Sigma \Delta Y_{2k}^2$	$S_{y_2}^2$
9	0,9124	0,9046	0,0077	$6 \cdot 10^{-5}$	0,0012	0,0006
10	0,8770		-0,0275	0,0007		
11	0,9244		0,0198	0,0004		

Таблица 8

Доверительные интервалы уравнений регрессии

Уравнение регрессии	$T (f = 2, \alpha = 0,05)$	S_{b_i}	Δb_i
Y_1	4,3	0,005	$\pm 0,0215$
Y_2		0,006	$\pm 0,0258$

В уравнения регрессии вошли коэффициенты, абсолютная величина которых больше или равна доверительному интервалу $|b_i| \geq \Delta b_i$:

$$Y_1 = 0,091 - 0,033x_1 + 0,046x_2 + 0,033x_3 - 0,023x_1x_2 + 0,028x_2x_3 - 0,056x_1x_3 - 0,046x_1x_2x_3; \quad (2)$$

$$Y_2 = 1,073 - 0,0847x_1 + 0,0480x_2 + 0,14105x_3 - 0,150x_1x_2 - 0,041x_2x_3 + 0,0698x_1x_3 - 0,072x_1x_2x_3. \quad (3)$$

Адекватность моделей проверяли по критерию F , сравнивая табличное $F_{\text{табл}}$ и расчетное $F_{\text{расч}}$ значения:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_{y_i}^2};$$

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{iuk \text{ расч}} - Y_{iuk})^2}{f_2}$$

— дисперсия неадекватности, где $Y_{iuk \text{ расч}}$ — расчетное значение по уравнению регрессии; Y_{iuk} — экспериментальное значение; f_2 — число степеней свободы определения дисперсии неадекватности.

Полученные уравнения регрессии достоверно отражают влияние технологических параметров на функции Y_1 и Y_2 , так как для двух уравнений выполнено условие $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$.

Анализ значений коэффициентов b_i в уравнениях регрессии (2) и (3) показал, что в исследуемой области варьирования технологических параметров влияние линейных эффектов x_i на пористость и склонность к образованию микротрещин идентично, однако если на пористость наиболее существенно влияет межтрековое расстояние, то на долю несплошностей — мощность лазера (рис. 4). Пористость значительно зависит от парного взаимодействия скорости сканирования и мощности, а также тройного взаимодействия между технологическими параметрами. Склонность к образованию микротрещин в большой степени определяется соотношением скорости сканирования и межтрекового расстояния.

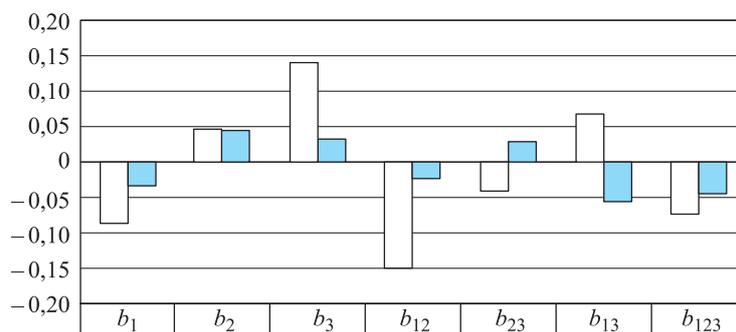


Рис. 4. Влияние факторов и их взаимодействий на пористость (темное поле) и несплошность (светлое поле) сплава после СЛС

Иллюстрацией влияния режимов СЛС на объемные доли микропор и несплошностей в структуре синтезированного сплава являются графики, построенные при условии варьирования одного из технологических параметров и фиксированных значениях двух остальных (рис. 5, 6).

Как следует из приведенных результатов, влияние технологических параметров на дефектность структуры неоднозначно. Например, увеличение мощности лазера уменьшает пористость при максимальной скорости сканирования и увеличивает при минимальной скорости независимо от межтрекового расстояния (рис. 5, а). Увеличение мощности неблагоприятно влияет на долю несплошностей.

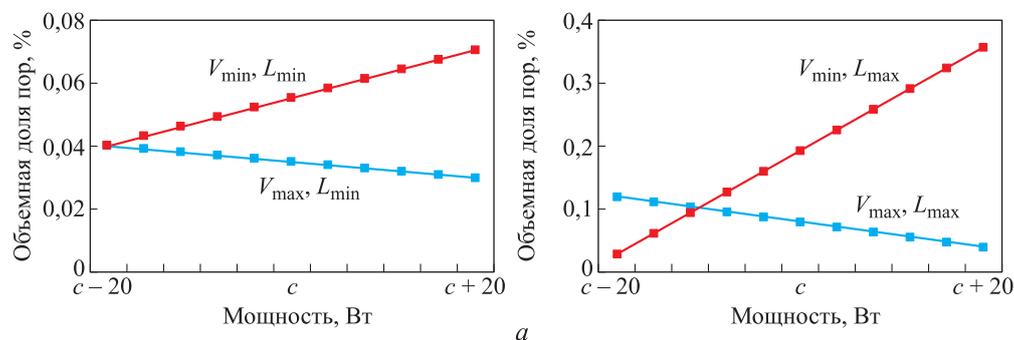


Рис. 5 (начало). Зависимость пористости сплава от технологических параметров СЛС (мощности лазера (а))

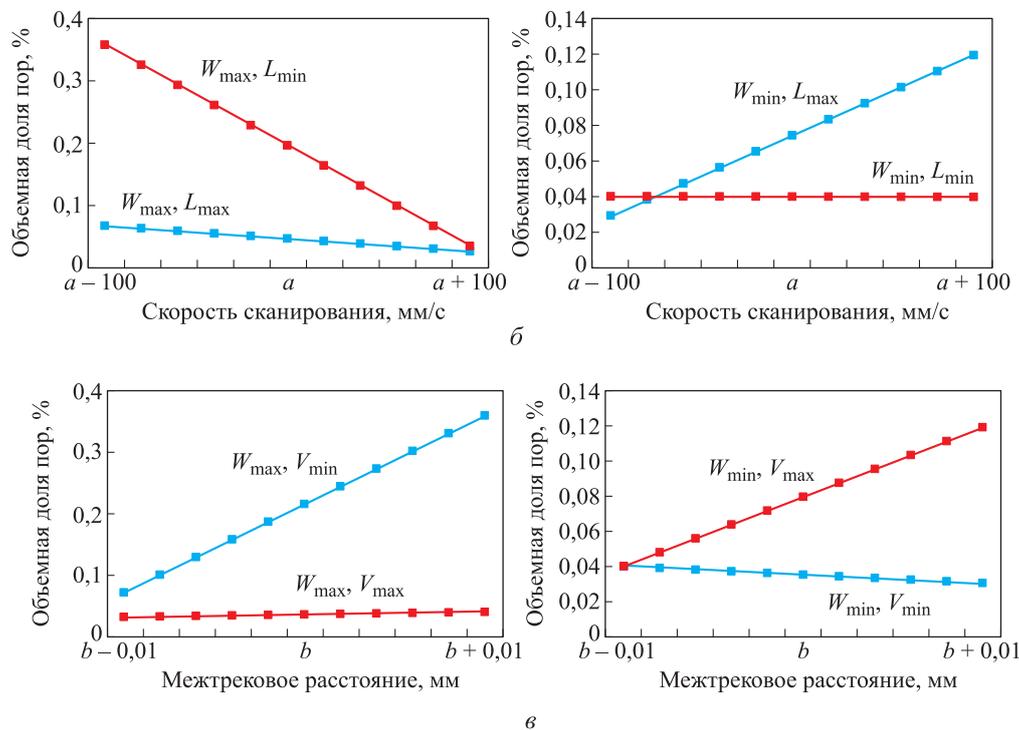


Рис. 5 (окончание). Зависимость пористости сплава от технологических параметров СЛС (скорости сканирования (б), межтрекового расстояния (в))

Уменьшение пористости по мере возрастания скорости сканирования наблюдается при высокой мощности лазера; если мощность низкая, то пористость, наоборот, увеличивается (рис. 5, б). Сочетание высоких значений мощности лазера и скорости сканирования способствует образованию трещин (рис. 6, б).

Уменьшение межтрекового расстояния существенно снижает пористость при определенном соотношении мощности и скорости сканирования: один параметр должен иметь максимальное значение, другой — минимальное (рис. 5, в).

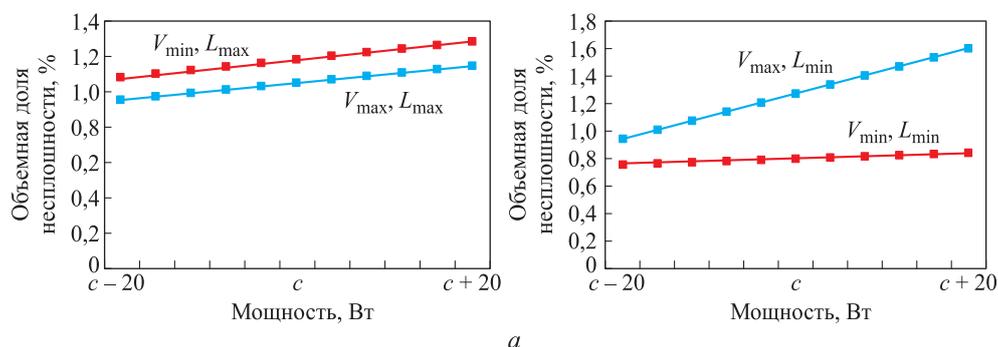


Рис. 6 (начало). Зависимость объемной доли микротрещин в структуре синтезированного сплава от технологических параметров (а — см. рис. 5)

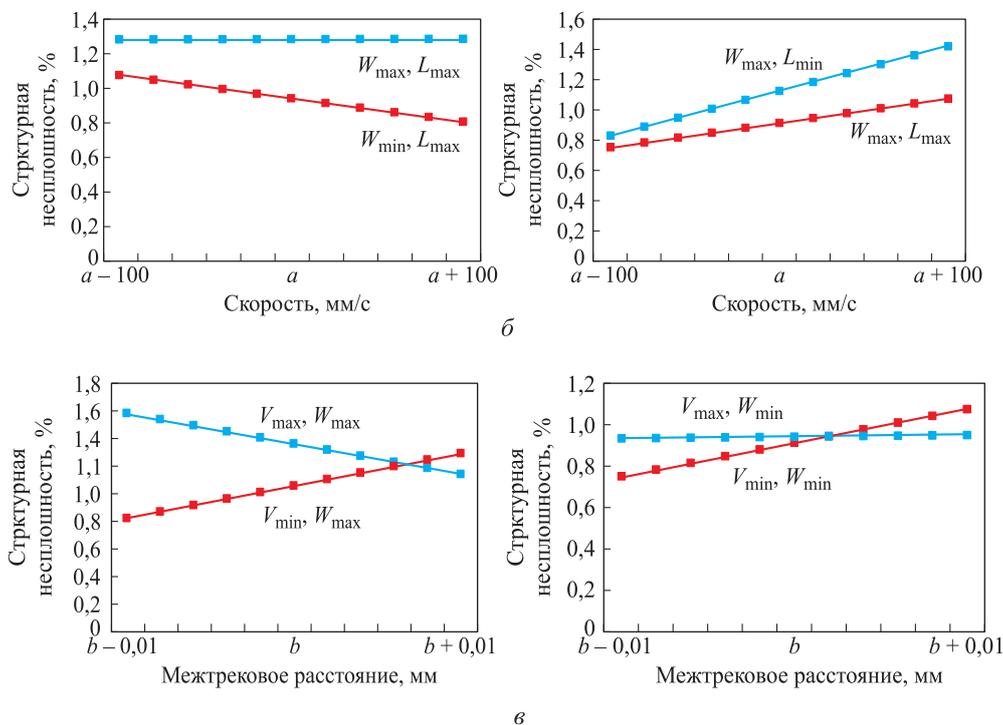


Рис. 6 (окончание). Зависимость объемной доли микротрещин в структуре синтезированного сплава от технологических параметров (б-в — см. рис. 5)

Такое влияние технологических параметров на структуру синтезированного сплава, очевидно, объясняется сложными физическими процессами при лазерном воздействии. Повышение мощности излучения, с одной стороны, увеличивает жидкотекучесть металла, глубину проплавления, с другой стороны, уменьшает перекрытие треков, увеличивает скорость охлаждения и, соответственно, термические напряжения. Уменьшение скорости сканирования увеличивает жидкотекучесть металла, время теплового воздействия и, следовательно, зону термического влияния.

С учетом установленных зависимостей выявили, что оптимальные параметры процесса СЛС имеют узкие пределы варьирования и требуют корреляции в зависимости от химического и гранулометрического составов сплавляемого порошка.

Выводы. Исследованы особенности структуры синтезированного сплава типа ВКНА-4УР, изучена взаимосвязь дефектов строения с технологическими параметрами СЛС. Для оптимизации режимов СЛС использован метод математического планирования эксперимента, позволивший разработать регрессионные модели, адекватно описывающие влияние мощности лазера, скорости сканирования и межтрекового расстояния на пористость и склонность к образованию трещин синтезированного сплава. В зависимости от значений мощности лазерного излучения, скорости сканирования, межтрекового расстояния объемная доля пор составляет 0,03...0,36 %; несплошностей — 0,75...1,58 %. Минимальное число пор в сплаве об-

разуется при высокой мощности лазера, скорости сканирования и небольшом межтрековом расстоянии; минимальная несплошность — при всех минимальных значениях параметров синтеза.

Выполненные исследования показывают перспективность использования интерметаллидного сплава для изготовления деталей методами аддитивных технологий, а также необходимость проведения последующей обработки в целях уменьшения числа дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г. и др. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. № 9. С. 62–80. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-9-62-80
4. Магеррамова Л.А., Ножницкий Ю.А., Васильев Б.Е., Кинзбургский В.С. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей перспективных газотурбинных двигателей // *Технология легких сплавов*. 2015. № 4. С. 7–13.
5. Каблов Е.Н., Колобов Ю.Р., ред. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанозональным упрочнением. М.: МИСиС, 2008. 328 с.
6. Морозова Г.И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 12. С. 52–56.
7. Поварова К.Б. Физико-химические принципы создания термически стабильных сплавов на основе переходных металлов // *Материаловедение*. 2007. № 12. С. 20–27.
8. Каблов Е.Н., Базылева О.А., Воронцов М.А. Новая основа для создания литейных высокотемпературных жаропрочных сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 8. С. 21–25.
9. Евгенов А.Г., Базылева О.А., Королев В.А., Аргинбаева Э.Г. Перспективы применения сплава на основе интерметаллида Ni₃Al типа ВКНУ-4УР в аддитивных технологиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S1 (43). С. 31–35.
10. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля / О.А. Базылева, О.Г. Оспенникова, Э.Г. Аргинбаева, Е.Ю. Летникова, А.В. Шестаков // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 104–115.
11. Неруш С.В., Евгенов А.Г. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава марки ЭП648-ВИ применительно к лазерной LMD-наплавке, а также оценка качества наплавки порошкового материала на никелевой основе на рабочие лопатки ТВД // *Труды ВИАМ*. 2014. № 3. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1
12. Туренко Е.Ю., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Нефедов Д.Г. Сплав на основе интерметаллида Ni₃Al и изделие, выполненное из него. Патент 2569283 РФ. Опубл. 20.11.15.
13. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.

Базылева Ольга Анатольевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе» по науке Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Унчикова Марина Васильевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Головлев Никита Андреевич — техник лаборатории «Порошковая металлургия и аддитивное производство» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17); студент магистратуры кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Евгенов Александр Геннадьевич — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Порошковая металлургия и аддитивное производство» Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Базылева О.А., Унчикова М.В., Головлев Н.А., Евгенов А.Г. Исследование влияния технологических параметров селективного лазерного сплавления на дефекты строения никелевого сплава типа ВКНА-4УР // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 6. С. 90–102. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-6-90-102

INVESTIGATING THE CORRELATION BETWEEN SELECTIVE LASER MELTING PARAMETERS AND STRUCTURAL DEFECTS IN A VKNA-4UR-TYPE NICKEL ALLOY

O.A. Bazyleva¹

M.V. Unchikova²

N.A. Golovlev^{1,2}

A.G. Evgenov¹

lab3@viam.ru

unchikova_mv@mail.ru

ozyar@mail.ru

viam.lab16@mail.ru

¹ All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We investigated the correlation between selective laser melting modes and subsequent defects in a VKNA-4UR-type nickel alloy. We developed regression models that describe sufficiently well how laser power, scanning speed and the distance between laser paths affect porosity and crack formation tendencies in the resulting alloy. We determined which processing modes produce the lowest number of defects possible

Keywords

Heat-resistant intermetallic nickel alloy, additive manufacturing, selective laser melting, laser power, distance between paths, scanning speed, porosity, microcracks, structural defects

Received 23.03.2018

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Kablov E.N. Strategic areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2012, no. S, pp. 7–17 (in Russ.).
- [2] Kablov E.N. Innovative developments of FSUE "VIAM" SSC of RF on realization of "Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030". *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 1 (34), pp. 3–33 (in Russ.).
- [3] Kablov E.N., Evgenov A.G., Ospennikova O.G., et al. Metal power compositions for the EP648 heat resistant alloy manufactured by all-russian research institute for aircraft materials VIAM for selective laser melting, laser metal deposition and metal injection molding technologies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2016, no. 9, pp. 62–80 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2016-9-62-80
- [4] Magerramova L.A., Nozhnitskiy Yu.A., Vasil'ev B.E., Kinzburskiy V.S. The use of additive technologies for production of advanced gas-turbine engine components. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, no. 4, pp. 7–13 (in Russ.).
- [5] Kablov E.N., Kolobov Yu.R., eds. *Struktura i svoystva intermetallidnykh materialov s nanofaznym uprochneniem* [Structure and properties of intermetallic materials with nanophased hardening]. Moscow, MISiS Publ., 2008. 328 p.
- [6] Morozova G.I. Compensation of imbalance of alloying of refractory nickel alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, no. 12, pp. 52–56 (in Russ.).
- [7] Povarova K.B. Physicochemical principles of creating the thermally stable alloys on basis of aluminides of transition metals. *Materialovedenie*, 2007, no. 12, pp. 20–27 (in Russ.).
- [8] Kablov E.N., Bazyleva O.A., Vorontsov M.A. Novel foundations for development of castable high-temperature superalloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2006, no. 8, pp. 21–25 (in Russ.).
- [9] Evgenov A.G., Bazyleva O.A., Korolev V.A., Arginbaeva E.G. Prospects of Ni₃Al-based intermetallic alloy VKNA-4UR application in additive technologies. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2016, no. S1(43), pp. 31–35 (in Russ.).
- [10] Bazyleva O.A., Ospennikova O.G., Arginbaeva E.G., Letnikova E.Yu., Shestakov A.V. Development trends of nickel-based intermetallic alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2017, no. S, pp. 104–115 (in Russ.).
- [11] Nerush S.V., Evgenov A.G. Research of fine-dispersed metal powder of the heat resisting alloy of the EP648-VI brand for laser metal deposition (LMD) and also the assessment quality of welding of powder material on the nickel basis on working blades THP. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2014, no. 3 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1
- [12] Turenko E.Yu., Kablov E.N., Bazyleva O.A., Nefedov D.G. Splav na osnove intermetallida Ni₃Al i izdelie, vypolnennoe iz nego [Alloy based on Ni₃Al intermetallide and product made of it]. Patent 2569283 RF. Publ. 20.11.15.
- [13] Novik F.S., Arsov Ya.B. Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimenta [Optimization of metal technology processes using experimental design methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 304 p.

Bazyleva O.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Deputy Head of Laboratory of Heat-Resistant Nickel Alloys in charge of research work, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Unchikova M.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Golovlev N.A. — Technician, Laboratory of Powder Metallurgy and Additive Manufacturing, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation); Master's Degree student, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Evgenov A.G. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Laboratory of Powder Metallurgy and Additive Manufacturing, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (Radio ul. 17, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Bazyleva O.A., Unchikova M.V., Golovlev N.A., Evgenov A.G. Investigating the Correlation between Selective Laser Melting Parameters and Structural Defects in a VKNA-4UR-Type Nickel Alloy. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 6, pp. 90–102 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-6-90-102



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов
В.А. Одинцова, С.В. Ладова, Д.П. Левина

«Оружие и системы вооружения»

В систематизированном виде изложены сведения об оружии и системах вооружения как объектах, обеспечивающих поражение целей с помощью различных боеприпасов. Приведен краткий обзор истории развития вооружения. Даны определения понятий «оружие», «комплекс вооружения», «система вооружения». Рассмотрены состав, структура, основные свойства и боекомплекты комплексов вооружения.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru