ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 22. Выпуск 5.

УДК 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2018-22-5-252-262

**Численные методы оптимизации процесса сплавления
электроэрозионных частиц сплава КХМС¹**

Е. В. Агеев, А. Ю. Алтухов, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева, А. А. Калинин

Агеев Евгений Викторович — доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Алтухов Александр Юрьевич — кандидат технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (г. Курск).

e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич — доктор технических наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Кузовлева Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Калинин Антон Алексеевич — Тульский государственный университет (г. Тула).

e-mail: antony_ak@mail.ru

Аннотация

В работе представлены результаты оптимизации сплавления электроэрозионной кобальтохромовой шихты, которую проводили путем постановки полного факторного эксперимента и метода крутого восхождения Бокса и Уилсона. Определены оптимальные параметры процесса получения кобальтохромового сплава искровым плазменным спеканием частиц сплава КХМС по твердости. В качестве факторов были выбраны параметры работы установки искрового плазменного сплавления: температура, давление и время выдержки. Оптимальные параметры работы установки определяли для электроэрозионного материала КХМС, ранее полученного в спирте бутиловом. Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации (твердость) для процесса сплавления электроэрозионной кобальтохромовой шихты, которые составили: 223,8 НВ при давлении 30 МПа, температуре 560 °С и времени выдержки 3 минуты.

Ключевые слова: электроэрозионный кобальтохромовый порошок, искровое плазменное сплавление, оптимизация процесса, твердость.

Библиография: 23 названия.

Для цитирования:

Е. В. Агеев, А. Ю. Алтухов, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева, А. А. Калинин. Численные методы оптимизации процесса сплавления электроэрозионных частиц сплава КХМС // Чебышевский сборник, 2021, т. 22, вып. 5, с. 252–262.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда. Номер проекта 17-79-20336-П.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 22. No. 5.

UDC 621.762.227

DOI 10.22405/2226-8383-2018-22-5-252-262

**Numerical methods for optimizing the process
of fusion of electroerosive particles of the KHMS alloy²**

E. V. Ageev, A. Yu. Altukhov, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, A. A. Kalinin

Ageev Yevgeniy Viktorovich — doctor of technical sciences, Southwestern State University (Kursk).

e-mail: ageev_ev@mail.ru

Altukhov Alexander Yuryevich — candidate of technical sciences, associate professor, Southwestern State University (Kursk).

e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Gvozdev Aleksander Evgenyevich — doctor of technical sciences, professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Kuzovleva Olga Vladimirovna — candidate of technical sciences, docent, Russian State University of Justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Kalinin Anton Alekseevich — Tula State University (Tula).

e-mail: antony-ak@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of optimizing the fusion of an electroerosive cobalt-chromium charge, which was carried out by setting up a complete factor experiment and the method of steep ascent of Box and Wilson. The optimal parameters of the process of obtaining a cobalt-chromium alloy by spark plasma sintering of particles of the KHMS alloy in hardness have been determined. The parameters of operation of the spark plasma fusion plant were selected as factors: temperature, pressure and holding time. The optimal parameters of the installation were determined for the electroerosive material KHMS, previously obtained in butyl alcohol. According to the conducted series of experiments, the limiting values of the optimization parameter (hardness) for the process of fusing an electroerosive cobalt-chromium charge were determined, which amounted to: 223.8 HB at a pressure of 30 MPa, a temperature of 560 ° C and a holding time of 3 minutes.

Keywords: electroerosive cobalt-chromium powder, spark plasma fusion, process optimization, hardness.

Bibliography: 23 titles.

For citation:

E. V. Ageeva, E. V. Ageev, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, A. A. Kalinin, 2021, "Numerical methods for optimizing the process of fusion of electroerosive particles of the KHMS", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 22, no. 5, pp. 252–262.

²The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation. Project number 17-79-20336-P.

1. Введение

Создание новых многофункциональных мелкодисперсных сплавов, отличающихся сверхвысокой прочностью и другими уникальными свойствами, является приоритетным направлением развития современного металлургического производства. Однако это развитие сдерживается проблемой чрезвычайно высокой стоимости таких материалов, связанной с дефицитностью компонентов, технологической сложностью и дороговизной их получения. Одним из путей решения названной проблемы является переработка в мелкодисперсное сырье легковесных металлоотходов, содержащих дорогостоящие компоненты такие, как Cr, Co и др., силами собственных производственных мощностей предприятий при минимальных затратах энергии и экологическом уроне окружающей среды [1-9].

Основным требованием к порошкам для аддитивных технологий является сферическая форма частиц. Такие частицы наиболее компактно укладываются в определенный объем и обеспечивают «текучесть» порошковой композиции в системах подачи материала с минимальным сопротивлением. Кроме того, порошок должен содержать минимальное количество растворенного газа. Микроструктура порошка должна быть однородной и мелкодисперсной (с равномерным распределением фазовых составляющих) [10-19].

Исходя из требований аддитивного производства к форме порошкового материала предлагается технология электродиспергирования. Однако, до настоящего времени данный способ измельчения металлоотходов в порошковые материалы недостаточно изучен и в промышленности данный способ практически не применяется, ввиду отсутствия полноценных комплексных сведений о составе, структуре и свойствах диспергированных электроэрозией частиц, а также сплавов, полученных на их основе. Для этого требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований [20, 21].

Следует отметить, что электродиспергирование выгодно отличается от других способов получения порошков микро- и нанодисперсий относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой. Одним из преимуществ предложенной технологии является применение в качестве исходных материалов отходов, которое значительно дешевле чистых компонентов, используемых в традиционных технологиях. Кроме того, данная технология позволяет, за счет возможности регулирования в широких пределах энергетических параметров процесса, управлять распределением размеров и формой получаемых порошков [22, 23].

Для устранения указанных недостатков в рамках намеченных исследований для аддитивных технологий предлагаются к использованию порошковые композиции, полученные из сплавов на основе Co-Cr электроэрозионным диспергированием.

Решение данных задач позволит решить проблему создания многофункциональных мелкодисперсных сплавов за счет электроэрозионной металлургии отходов цветных металлов и легированных сплавов.

Целью настоящей работы являлось исследование сплавляемости электроэрозионных кобальтохромовых порошков, изготавливаемых для аддитивных изделий.

2. Основной текст статьи

Для получения Co-Cr порошковых материалов были выбраны отходы сплава марки КХМС «ЦЕЛЛИТ» (Co – 63%, Cr – 27%, Mo – 5%, Ni – 2%, Fe – 2%). Диспергирование этих отходов проводили в бутиловом спирте, который использовали в качестве рабочей жидкости, на установке для электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов (Патент РФ №2449859). В результате диспергирования отходов кобальтохромового сплава происходило его разрушение в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами, находящимися в рабочей жидкости с образованием частиц.

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	T, °C	P, МПа	t, мин.
		X ₁	X ₂	X ₃
Основной уровень	0	510	20	2
Интервал варьирования	Δx_i	50	10	1
Верхний уровень	+1	560	30	3
Нижний уровень	-1	460	10	1

Таблица 1: Уровни и интервалы варьирования

№ п/п	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	$\bar{Y}_i$	S ² _{воспр}
1	++	-	-	-	+	+	+	-	160	161	162	161	2
2	++ +	+	-	-	-	-	+	+	190	191	190	190,3	0,67
3	+	-	+	-	-	+	-	+	174	175	176	175	2
4	+	+	+	-	+	-	-	-	200	202	201	201	2
5	+	-	-	+	+	-	-	+	181	181	181	181	0
6	+	+	-	+	-	+	-	-	210	211	212	211	2
7	+	-	+	+	-	-	+	-	188	188	188	188	0
8	+	+	+	+	+	+	+	+	227	227	228	227,3	3,07

Таблица 2: Матрица планирования эксперимента

Заготовки сплавов получали в системе искрового плазменного сплавления SPS 25-10 «Thermal Technology» (США).

Из свойств, лимитирующих ресурс изделий, технологически просто и информативно определяется твердость, поэтому оптимизацию процесса сплавления проводили по твердости. Оптимизацию сплавления электроэрозионной кобальтохромовой шихты проводили путем постановки полного факторного эксперимента и метода крутого восхождения Бокса и Уилсона. Блок-схема методики оптимизации представлена на рисунках 1-3.

3. Результаты и их обсуждение

Согласно блок-схемам методики, представленным на рисунках 1-3, были выбраны уровни и интервалы варьирования (таблица 1) и составлены матрицы планирования для экспериментов, проведенных с электроэрозионными кобальтохромовыми частицами (таблица 2).

Согласно проведенным расчетам, было получено уравнение регрессии, моделирующие полный факторный эксперимент:

$$\hat{y} = 191,8 + 15,5X_1 + 6X_2 + 10X_3 + 0,75X_1X_2 + 1,75X_1X_3 - 0,18X_2X_3 + 1,58X_1X_2X_3$$

Проверка показала, что все коэффициенты уравнения являются значимыми.

Проверку уравнений на адекватность проводили с использованием критерия Фишера. В результате расчета установлено, что уравнение регрессии адекватно.

Полученное уравнение было использовано для расчета крутого восхождения по поверхности отклика. Крутое восхождение начинали из нулевой точки (основные уровни). Согласно проведенной серии опытов, результаты которых представлены в таблице 3, определены предельные значения параметра оптимизации $\hat{y}$ (твердость) для процесса сплавления электроэрозионных кобальтохромовых частиц, которые составили: 223,8 НВ при давлении 30 МПа, температуре 560 °C и времени выдержки 3 минуты.

Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса использована модель первого порядка вида

$$\hat{y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3$$

где X_1, X_2, X_3 – факторы,

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	0			
Интервал варьирования	Δx_i			
Верхний уровень	+1			
Нижний уровень	-1			

Каждый опыт проводится трижды (y_1, y_2, y_3).

Используя уравнения $X_1 = \frac{u-0}{\Delta x_{i(u)}}$; $X_2 = \frac{v-0}{\Delta x_{i(v)}}$; $X_3 = \frac{c-0}{\Delta x_{i(c)}}$, перекодируем значения факторов и составим матрицу планирования эксперимента.

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}_l$	$S^2_{\text{воспр}_l}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-					
2	+	+	-	-	-	-	+	+					
3	+	-	+	-	-	+	-	+					
4	+	+	+	-	+	-	-	-					
5	+	-	-	+	+	-	-	+					
6	+	+	-	+	-	+	-	-					
7	+	-	+	+	-	-	+	-					
8	+	+	+	+	+	+	+	+					

Рис. 1: Блок-схема методики оптимизации процесса сплавления (этап 1)

$$1. \bar{y}_i = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$$

2. Определяем дисперсию параллельных опытов:

$$S_{\text{воспр}_i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

3. Вычисляем сумму дисперсии воспроизводимости для всех опытов $\sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр}_i}^2$

4. Осуществляем проверку дисперсий с использованием критерия Кохрена:

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^n S_{\text{воспр}_i}^2}$$

Сравниваем $G_{\text{расч}}$ и $G_{\text{табл}}$. Если $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$, принимаем гипотезу об однородности дисперсий. Если $G_{\text{расч}} > G_{\text{табл}}$, дисперсия неоднородная.

5. Вычисляем дисперсию воспроизводимости для всех экспериментов

$$S_{\text{восп}}^2 = S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{воспр}_i}^2$$

6. Вычисляем ошибку всего эксперимента

$$S(y) = \sqrt{S_{(y)}^2}$$

7. Рассчитываем коэффициенты уравнения

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_1^N X_{in} \bar{y}_i, \quad b_0 = \frac{1}{N} \sum_1^N \bar{y}_i, \quad b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_1^N X_{in} X_{jn} \bar{y}_i$$

8. Составление уравнения регрессии

$$\hat{y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3$$

9. Проверяем статистическую значимость коэффициентов.

$$S(b_i) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nm}}$$

Далее определяем доверительный интервал длиной $2\Delta b_i$:

$$\Delta b_i = t_{\text{табл}} S(b_i)$$

Табличное значение $t_{\text{табл}}$ выбираем для числа степеней свободы $f = N(m - 1)$

Сравниваем Δb_i и b_i . Если $\Delta b_i > b_i$, то коэффициент не значимый – исключаем из уравнения регрессии. Если $\Delta b_i < b_i$, то коэффициент значимый – оставляем в уравнении регрессии.

10. Проверяем уравнение на адекватность

Находят значения F - критерия Фишера (дисперсное отношение):

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{восп}}^2} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{(y)}^2}$$

Для того чтобы воспользоваться таблицей F -критерия, необходимо определить число степеней свободы $f_{\text{ад}}$ и $f_{\text{восп}}$: $f_{\text{ад}} = N - 1$, $f_{\text{восп}} = N(m - 1)$.

Исходя из найденных значений $f_{\text{ад}}$, $f_{\text{восп}}$ находим по таблице $F_{\text{табл}}$. Если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то уравнение считают адекватным.

Рис. 2: Блок-схема методики оптимизации процесса сплавления (этап 2)

Рис. 3: Блок-схема методики оптимизации процесса сплавления (этап 3)

Наименование	X ₁ (T, °C)	X ₂ (P, МПа)	X ₃ (t, мин.)	$\hat{y}$, НВ
Основной уровень	510	20	2	—
Коэффициент b_i	15,5	6	10	—
Интервал варьирования ξ_i	50	10	1	—
$b_i \cdot \xi_i$	775	60	10	—
Шаг Δ_i	38,75	3	0,5	—
Округленный шаг	39	3	1	—
Опыт 1	549	23	3	214,9
Опыт 2	560	26	3	220,5
Опыт 3	560	29	3	223,1
Опыт 4 (max)	560	30	3	223,8

Таблица 3: Расчет крутого восхождения

4. Заключение

1. Проведено определение оптимальных параметров процесса сплавления электроэрозионных кобальтохромовых частиц искровым плазменным сплавлением путем проведения полного факторного эксперимента. В качестве факторов были выбраны параметры работы установки искрового плазменного сплавления: температура, давление и время выдержки. Оптимальные параметры работы установки определяли для электроэрозионного материала КХМС, ранее полученного в спирте бутиловом.
2. Согласно проведенной серии опытов определены предельные значения параметра оптимизации $\hat{y}$ (твердость) для процесса сплавления электроэрозионной кобальтохромовой шихты, которые составили: 223,8 НВ при давлении 30 МПа, температуре 560 °C и времени выдержки 3 минуты.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Song B., Dong S., Zhang B. et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. // Materials & Design, 2012, Vol. 35. P. 120–125.
2. Song B., Dong S., Coddet P. et al. Fabrication and microstructure characterization of selective laser melted FeAl intermetallic parts // Surface and Coatings Technology, 2012, Vol. 206. P. 4704–4709.
3. Loeber L., Biamino S., Ackelid U. et al. Comparison of Selective Laser and Electron Beam Melted Titanium Aluminides // Conference paper of 22nd International symposium “Solid freeform fabrication proceedings”, University of Texas, Austin, 2011. P. 547–556.
4. Biamino S., Penna A., Ackelid U. et al. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation // Intermetallics, 2011, Vol. 19. P. 776–781.
5. Safdar A., Wei L.Y., Snis A., Lai Z. Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti–6Al–4V // Materials Characterization, 2012, Vol. 65. P. 8–15.

6. Safdar A., He H.Z., Wei L.Y., Snis A. et al. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V // *Rapid Prototyping Journal*, 2012. Vol. 18 (5). pp.401–408.
7. Gu D.D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms // *International Materials Reviews*, 2012, Vol. 57 (3). P. 133-164.
8. Wang Z., Guana K., Gaoa M. The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting // *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, Vol. 513. P. 518–523
9. Григорьянц А.Г., Третьяков Р.С., Фунтиков В.А. Повышение качества поверхностных слоев деталей, полученных лазерной аддитивной технологией // *Технология машиностроения*. 2015. № 10. С. 68-73.
10. Вулпе М.Н., Колесников Д.Н., Морущкин А.Е. Лазерная сварка заготовок, полученных аддитивными технологиями // *Технология машиностроения и материаловедение*. 2017. № 1. С. 142-144.
11. Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Влияние ультразвуковой обработки на шероховатость поверхности деталей, полученных аддитивными технологиями // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2016. №. (315). С. 47-53.
12. Чумаков Д.М. Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники // *Труды МАИ*. 2014. № 78. С. 31.
13. Григорьянц А.Г., Новиченко Д.Ю., Смуров И.Ю. Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2011. № 7. С. 38-46.
14. Лейцин В.Н., Пономарев С.В., Дмитриева М.А., Ивонин И.В., Тырышкин И.М. Моделирование процесса спекания изделий из низкотемпературной керамики, формируемых аддитивными технологиями // *Физическая мезомеханика*. 2016. Т. 19. № 4. С. 21-27.
15. Волосова М.А., Окунькова А.А., Конов С.Г., Котобан Д.В. Аддитивные технологии: от технического творчества к инновационным промышленным технологиям // *Техническое творчество молодежи*. 2014. № 5 (87). С. 9-14.
16. Федоров М.М. Разработка замкнутой технологической цепочки изготовления деталей ГТД по аддитивным технологиям // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева*. 2017. № 1 (40). С. 115-118.
17. Ковалев О.Б. Моделирование процессов в технологиях лазерного аддитивного изготовления объемных металлоизделий // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2016. Т. 80. № 4. С. 408.
18. Смирнов В.В., Шайхутдинова Е.Ф. Внедрение аддитивных технологий изготовления деталей в серийное производство // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*. 2013. № 2-2. С. 90-94.
19. Смирнов В.В., Ганеев А.А., Шайхутдинова Е.Ф. Применение аддитивных технологий для изготовления деталей из интерметаллидных сплавов на основе титана // *Ползуновский альманах*. 2013. №. 2. С. 78-80.

20. Ageev E.V., Latypov R.A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2014. Т. 55. No. 6. pp. 577-580.
21. Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. Manufacture of cobalt–chromium powders by the electric discharge dispersion of wastes and their investigation // *Russian metallurgy (Metally)*. 2018. Т. 2018. No. 12. pp. 1177-1180.
22. Агеев Е.В., Латыпов Р.А. Получение и исследование заготовок твердого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамсодержащих отходов // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2014. № 5. С. 50-53.
23. Аддитивные изделия из электроэрозионного кобальтохромового порошка / Е.В.Агеев, Е.В.Агеева, А.Ю. Алтухов // *Металлург*. 2021. – №10. – С. 78-81.

REFERENCES

1. Song, B., Dong, S., Zhang, B. et al. 2012, “Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V“, *Materials & Design*, Vol. 35. P. 120–125.
2. Song, B., Dong, S., Coddet, P. et al. 2012, “Fabrication and microstructure characterization of selective laser melted FeAl intermetallic parts“, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 206. P. 4704–4709.
3. Loeber, L., Biamino, S., Ackelid, U. et al. 2011, “Comparison of Selective Laser and Electron Beam Melted Titanium Aluminides“, *Conference paper of 22nd International symposium “Solid freeform fabrication proceedings”*, University of Texas, Austin, P. 547-556.
4. Biamino, S., Penna, A., Ackelid, U. et al. 2011, “Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation“, *Intermetallics*, Vol. 19. P. 776–781.
5. Safdar, A., Wei, L.Y., Snis, A., Lai, Z. 2012, “Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti–6Al–4V“, *Materials Characterization*, Vol. 65. P. 8–15.
6. Safdar, A., He H. Z., Wei L. Y., Snis, A. et al. 2012, “Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti–6Al–4V“, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 18 (5). pp.401–408.
7. Gu D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., Poprawe, R. 2012, “Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms“, *International Materials Reviews*, Vol. 57 (3). P. 133-164.
8. Wang, Z., Guana, K., Gaoa, M. 2012, “The microstructure and mechanical properties of deposited-IN718 by selective laser melting“ *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 513. P. 518–523
9. Grigoryants A.G., Tretyakov R.S., Funtikov V.A. 2015, “Improving the quality of surface layers of parts obtained by laser additive technology“, *Technology of mechanical engineering*. № 10. С. 68-73.
10. Vulpe M.N., Kolesnikov D.N., Morushkin A.E. 2017, “Laser welding of blanks obtained by additive technologies“, *Technology of mechanical engineering and materials science*. № 1. С. 142-144.

11. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. 2016, "Influence of ultrasonic treatment on the surface roughness of parts obtained by additive technologies", *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. №. (315). С. 47-53.
12. Chumakov D.M. 2014, "Prospects for the use of additive technologies in the creation of aviation and rocket and space technology", *Proceedings of MAI*. № 78. С. 31.
13. Grigoryants A.G., Novichenko D.Yu., Smurov I.Yu. 2011, "Laser additive manufacturing technology of coatings and parts made of composite material", *News of higher educational institutions. Mechanical engineering*. № 7. С. 38-46.
14. Leitsin V.N., Ponomarev S.V., Dmitrieva M.A., Ivonin I.V., Tyryshkin I.M. 2016, "Modeling of the sintering process of products made of low-temperature ceramics formed by additive technologies", *Physical Mesomechanics*. Т. 19. № 4. С. 21-27.
15. Volosova M.A., Okunkova A.A., Konov S.G., Kotoban D.V. 2014, "Additive technologies: from technical creativity to innovative industrial technologies", *Technical creativity of youth*. № 5 (87). С. 9-14.
16. Fedorov M.M. 2017, "Development of a closed technological chain for the manufacture of GTE parts using additive technologies", *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov*. № 1 (40). С. 115-118.
17. Kovalev O.B. 2016, "Modeling of processes in technologies of laser additive manufacturing of bulk metal products", *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The series is physical*. Т. 80. № 4. С. 408.
18. Smirnov V.V., Shaikhutdinova E.F. 2013, "Introduction of additive manufacturing technologies of parts into serial production", *Bulletin of Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*. № 2-2. С. 90-94.
19. Smirnov V.V., Ganeev A.A., Shaikhutdinova E.F. 2013, "Application of additive technologies for the manufacture of parts from intermetallic alloys based on titanium", *Polzunovsky Almanac*. №. 2. С. 78-80.
20. Ageev E.V., Latypov R.A. 2014, "Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes", *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. Т. 55. No. 6. pp. 577-580.
21. Latypov R.A., Ageev E.V., Altukhov A.Y., Ageeva E.V. 2018, "Manufacture of cobalt-chromium powders by the electric discharge dispersion of wastes and their investigation", *Russian metallurgy (Metally)*. Т. 2018. No. 12. pp. 1177-1180.
22. Ageev E.V., Latypov R.A. 2014, "Obtaining and research of hard alloy blanks from powders obtained by electroerosive dispersion of tungsten-containing waste", *Izvestiya vysshochnykh uchebnykh uchebnykh. Non-ferrous metallurgy*. № 5. С. 50-53.
23. Ageev E.V., Ageeva E.V., Altukhov A.Yu. 2021, "Additive products from electroerosive cobalt-chromium powder", *Metallurg*. — №10. — С. 78-81.

Получено 18.09.2021 г.

Принято в печать 21.12.2021 г.