

Научная статья  
УДК 620.18: 621.45  
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182568>

## МОДИФИКАЦИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ ПОВЕРХНОСТИ CoCrMo-ОБРАЗЦОВ ДЕТАЛЕЙ ГТД, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кирилл Михайлович Ериков<sup>1✉</sup>, Оксана Анатольевна Быщенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Объединенная двигателестроительная корпорация,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> Московское машиностроительное предприятие им. В.В. Чернышева,  
Москва, Россия

<sup>1</sup> kirillerikov96@gmail.com ✉

**Аннотация.** Рассмотрено влияние режимов обработки с помощью высокоточных импульсных электронных пучков (СИЭП) на шероховатость и микротвердость поверхности образцов из сплава системы CoCrMo, полученных с помощью аддитивных технологий. Показано, что обработка импульсными электронными пучками позволяет снизить шероховатость и повысить микротвердость поверхностного слоя. Использование установки ГЕЗА-ММП позволяет снизить шероховатость на 70%, а установки РИТМ-СП на – 40%. Образовавшийся после облучения СИЭП слой карбидов повысил микротвердость образцов в среднем на 20–25%.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, SLM-технологии, постобработка, высокоточные импульсные электронные пучки, шероховатость, микротвердость

**Для цитирования:** Ериков К.М., Быщенко О.А. Модификация при облучении импульсными электронными пучками поверхности CoCrMo-образцов деталей ГТД, полученных с помощью аддитивных технологий // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 139–146. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182568>

Original article

## SURFACE MODIFICATION OF GTE PARTS SAMPLES MADE FROM CoCrMo BY ADDITIVE TECHNOLOGIES WHILE IRRADIATION BY PULSED ELECTRON BEAMS IRRADIATION

Kirill M. Erikov<sup>1✉</sup>, Oksana A. Bytsenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> United Engine Corporation,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup> Machine-building plant “Moscow Machine-building Enterprise named after V.V. Chernyshev”,  
Moscow, Russia

<sup>1</sup> kirillerikov96@gmail.com ✉

### Abstract

The article considers the modes of the machining by pulsed electron beams effect on the surface roughness and micro-hardness of the samples from the CoCrMo system alloy obtained by the additive technologies. The authors formulated the basic disadvantages of conventional production and post-production methods, which lies in the fact that billets from cobalt-chromium alloys are being obtained for the most part by casting by the investment

casting due to the poor machinability, formability and weldability. This casting method is quite laborious, and there is a risk of obtaining metallurgical defects as well. Besides, the the new technological process development and the production preparation require significant material and time costs. The authors proposed a post-processing technique with the high-current pulsed electron beams. RITM-SP integrated installation with low-energy high-current beams source and GEZA-MMP industrial installation with high-energy high-current electron beams source were employed for irradiation. The difference in surface modification by to the type of applied equipment was revealed. Namely, irradiation with a pulsed electron beam modifies a surface up to 8 microns thick with the RITM-SP installation, and over 44 microns when irradiated with the GEZA-MMP installation. Both surface and subsurface layers condition of the samples was studied by optical microscopy with a metallographic microscope. The article demonstrates that the pulsed electron beam effects significantly the labor intensity of parts machining and is a highly effective tool for surface modifying of the samples made by selective laser fusion from the CoCrMo alloy. The authors studied the interdependence of the electron beam processing modes and the positive dynamics of the important surface criteria changes (microhardness and roughness) of samples from the CoCrMo system alloy produced by additive technologies. The studies revealed that application of the pulsed electron beam processing reduces the surface roughness. While irradiating with GEZA-MMP about 70% and with the RITM-SP about 40%, the authors managed to increase the micro-hardness by 20-25% as well. This fact is associated with the molybdenum content increase in the surface layer. The results of the conducted research substantiate the vector of further refinement of the technological process of electron beam processing of products and efforts on determining the operational properties of cobalt-chromium alloys, including fatigue trials and heat-resistant tests.

**Keywords:** additive technologies, SLM technologies, post-processing, high-current pulsed electron beams, roughness, micro-hardness

**For citation:** Erikov K.M., Bytsenko O.A. Surface Modification of GTE Parts Samples Made from CoCrMo by Additive Technologies while Irradiation by Pulsed Electron Beams Irradiation. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 139-146. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182568>

---

## Введение

Интерес к аддитивным технологиям в авиационном двигателестроении как к альтернативе традиционным технологическим методам производства функциональных деталей объясняется его преимуществами, основные из которых – это уменьшение на порядок времени производственного цикла мелкосерийного производства и упрощение технологических цепочек [1].

Жаропрочные кобальтохромовые сплавы широко применяются во многих областях техники, таких как авиационное двигателестроение, ядерная промышленность и газотурбинная промышленность [2–3], благодаря их превосходным характеристикам: коррозионной стойкости, износостойкости, высокому сопротивлению ползучести и термостойкости [4–7].

В авиационном двигателестроении заготовки из кобальтохромовых сплавов в основном получают литьем по выплавляемым моделям по причине их плохой обрабатываемости, формруемости и свариваемости. Данный метод литья достаточно трудоемкий, к тому же остается риск получения металлургических дефектов. Кроме того, разработка нового технологического процесса и подготовка производства требуют значительных материальных и временных затрат.

Внедрение технологии аддитивного производства в процесс изготовления деталей авиационных

ГТД из кобальтохромовых сплавов открыло новые возможности. Порошковые технологии, такие как селективное лазерное сплавление (SLM) или электронно-лучевое плавление (EBM), позволяют напрямую изготавливать детали сложной формы с высокой точностью благодаря последовательной обработке небольшого количества мелкодисперсных порошков точно сфокусированным энергетическим лучом.

Известно, что применение аддитивных технологий не только существенно уменьшает объемы последующей обработки, но и повышает качество благодаря тому, что конфигурация заготовок наиболее близка к конфигурации конечного изделия. Мировое экспертное сообщество связывает нынешний этап развития аддитивных технологий с развивающимися инновациями машиностроения. Актуальность метода «непосредственного выращивания» металлических изделий становится альтернативой традиционной технологии производства в высокотехнологичных отраслях авиации, авиационном двигателестроении, энергетическом машиностроении и космической индустрии [1, 8].

Послойный принцип создания детали, предполагаемый технологией селективного лазерного сплавления, позволяет достичь требуемого уровня качества поверхности детали авиационного ГТД,

основным критерием которого является чистота поверхности [9].

Достаточно острые технологические вопросы относятся к постобработке таких изделий. Традиционно всю постобработку изделий аддитивного производства принято делить на первичную и вторичную. Первичный этап состоит из шагов, обязательных для всех изделий. Действия на данном этапе зависят от используемой аддитивной технологии и, традиционно, состоят из отделения детали от основания, удаления поддерживающих элементов и очистки образца. Глубокая обработка модели служит улучшению функциональных характеристик и эстетического вида изделия и является этапом вторичной постобработки. Ее необходимость обусловлена требованиями полного соответствия образца, полученного в процессе печати, готовому изделию. Задача настоящего момента – рассматривать возможности различных методов при окончательной обработке подобных моделей [10–12].

Выделяются следующие типовые операции постобработки:

– горячее изостатическое прессование, направленное на повышение усталостной прочности изделия и уменьшение его пористости;

– термическая обработка с целью снятия остаточных напряжений;

– механическая обработка для доведения образца до соответствия требованиям по допускам и размерам в процессе подготовки функциональных поверхностей;

– процессы обработки поверхности с целью придания ей требуемого качества.

Вышеуказанные операции позволяют нивелировать большое количество дефектов, которые возникают из-за того, что для процесса сплавления порошка характерен локальный высокотемпературный подвод энергии за очень короткое время воздействия лазерного луча на обрабатываемый материал, что оказывает значительное влияние на микроструктуру материала. Микроструктурная неоднородность оказывает отрицательное влияние на механические и функциональные свойства детали [13, 14].

Если говорить о механической обработке, то следует отметить, что для кобальтовых сплавов системы CoCrMo механическая обработка остается сложной. Низкая обрабатываемость указанных сплавов обусловлена их свойствами (деформационное упрочнение высокого уровня, низкая теплопроводность, повышение твердости соответственно температуре в сочетании с высокой износостойкостью). Следовательно, следует отдать предпочтение технологиям обработки ионными пучками и электронными пучками (родственными внутрен-

ним процессам в материале деталей, получаемых методом селективного лазерного сплавления) для уменьшения шероховатости и аннулирования поверхностных и подповерхностных дефектов слоя.

В современных технологиях широко применяются высококонцентрированные источники энергии [15, 16]. Модификация поверхностей и формирование защитных, упрочняющих слоев поверхности являются следствием воздействия нагрева/охлаждения со сверхвысокими скоростями. В результате создаются уникальные свойства и структуры материалов, резко отличающиеся от исходно-равновесного состояния обрабатываемого материала.

Цель данной статьи – рассмотреть варианты и возможности сильноточных импульсных электронных пучков применительно к постобработке деталей и образцов из сплавов на основе кобальта, получаемых методом аддитивных технологий, востребованных авиационным двигателестроением, а также перспективу повышения эксплуатационных свойств поверхностных и подповерхностных слоев.

#### Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы полуцилиндрической формы, полученные методом SLM-технологии из порошка кобальтового сплава системы CoCrMo.

Для облучения использовались установки:

• РИТМ-СП – интегрированная установка с источником НСЭП (низкоэнергетических сильноточных электронных пучков);

• ГЕЗА-ММП – промышленная установка, источник ВСЭП (высокоэнергетических сильноточных электронных пучков).

Исследовался сплав системы CoCrMo. Режимы облучения поверхности образцов данного сплава на установках ГЕЗА-ММП и РИТМ-СП основаны на взаимодозначной последовательности, полученной ранее, в зависимостях для титановых, жаропрочных и никелевых сплавов, изготовленных традиционным методом [17, 18]. В табл. 1 представлены параметры режимов облучения.

После облучения проводился замер шероховатости ( $R_a$ ) в соответствии с ГОСТ 19300-86 «Средства измерений шероховатости профилем методом».

Состояние поверхностных и подповерхностных слоев образцов исследовано методом оптической микроскопии с помощью металлографического микроскопа Axovert 40 с заданным диапазоном увеличений 50–500 крат. Применен также метод растровой электронной микроскопии (РЭМ). Использовался растровый электронный микроскоп TESCAN 5130 LM VEGA (с диапазоном увеличения от 2000 до 10000 крат). Рентгеноспектральный

Таблица 1  
Режимы облучения на ускорителях РИТМ-СП и ГЕЗА-ММП

| № образца                 | Режим облучения      |  |
|---------------------------|----------------------|--|
|                           | Число импульсов, $n$ | Плотность энергии $W$ , Дж/см <sup>2</sup> |
| <b>Установка РИТМ-СП</b>  |                      |  |
| 2.4                       | 30                   | $\sim 7,1 \pm 1,5$                         |
| 2.5                       | 45                   | $\sim 6,2 \pm 1,2$                         |
| 2.6                       | 45                   | $\sim 7,1 \pm 1,5$                         |
| <b>Установка ГЕЗА-ММП</b> |                      |  |
| 1.10                      | 6                    | 27   |
| 1.11                      | 6                    | 30   |
| 1.12                      | 6                    | 35   |

микроанализ (РСМА) проведен на энергодисперсионном рентгеновском микроанализаторе Oxford X-MaxN 80T.

На рис. 1 показан внешний вид облучаемых образцов в разных режимах. Металлографический анализ выполнен на линии пробоподготовки “Struers” (Дания).

Исследование проводилось как без травления, так и после травления в реактиве с составом из смеси концентрированных азотной  $\text{HNO}_3$  (одна часть) и соляной  $\text{HCl}$  (пять частей) кислот.

Микротвердомер ПМТ-3 (использованная нагрузка 20 гс) применен для измерения микротвердости  $H_c$ .

### Результаты исследований и обсуждение

Параметры шероховатости поверхностного слоя образцов после облучения, изготовленных по SLM-технологии из сплава системы  $\text{CoCrMo}$ , представлены в табл. 2. Исходная шероховатость  $R_a = 5,8$  мкм.

Табличные данные показывают, что наименьшая шероховатость достигнута при облучении на установке РИТМ-СП по режиму  $W = 7,1 \pm 1,5$  Дж/см<sup>2</sup> при числе импульсов, равном 45 ( $R_a = 3,7$  мкм), минимальная шероховатость после облучения на опытно-промышленной установке ГЕЗА-ММП была получена при числе импульсов, равном 6, и плотности энергии, равной 35 Дж/см<sup>2</sup>. Облучение на установке РИТМ-СП снижает итоговую шероховатость более чем на 40%. На установке ГЕЗА-ММП уменьшение значения данного параметра составило свыше 70%. Облучение на различных установках показывает значительную разницу в снижении шероховатости поверхности.

При исследовании поверхностного слоя образцов методом оптической микроскопии было установлено, что на поверхности образцов наблюдается измененный слой. Замер измененного слоя проводился в 10 точках, среднее значение представлено в табл. 2.

При проведении металлографического анализа образца № 2.4 с максимальной шероховатостью после облучения на установке РИТМ-СП наблюдается измененный слой размером до 7,1 мкм (рис. 2).

Максимальный размер модифицированного слоя образца № 1.10 после облучения на установке ГЕЗА-ММП дает минимальное снижение шероховатости и составляет 26,8 мкм (рис. 2).

На рис. 3 представлена полученная после облучения на установке ГЕЗА-ММП микроструктура поверхностного слоя образцов с минимальными значениями шероховатости. Отмечен модифицированный слой образца № 1.12, имеющий две

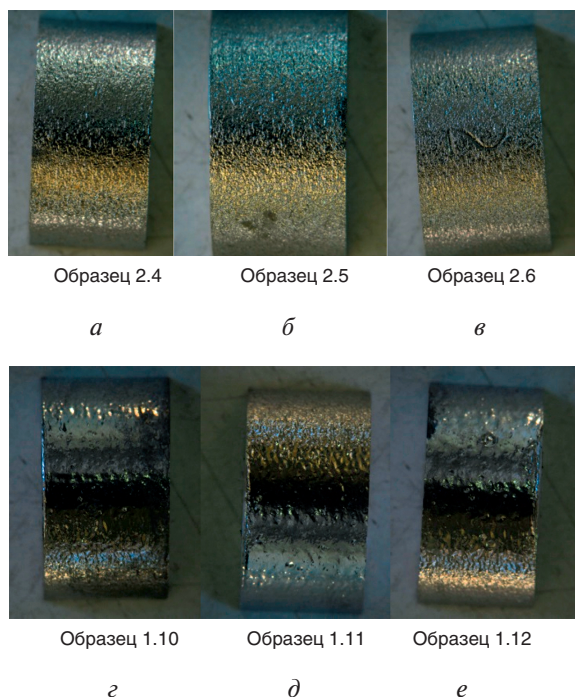


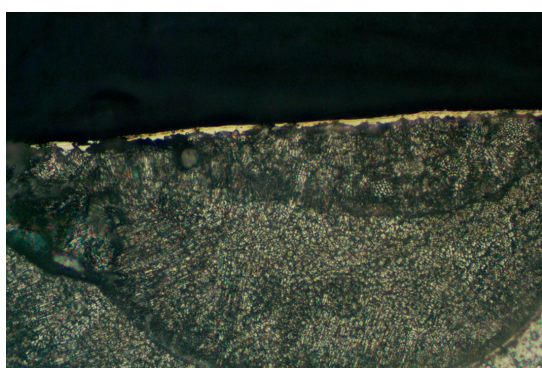
Рис. 1. Внешний вид образцов после облучения на установке РИТМ-СП (а, б, в) и ГЕЗА-ММП (з, д, е)



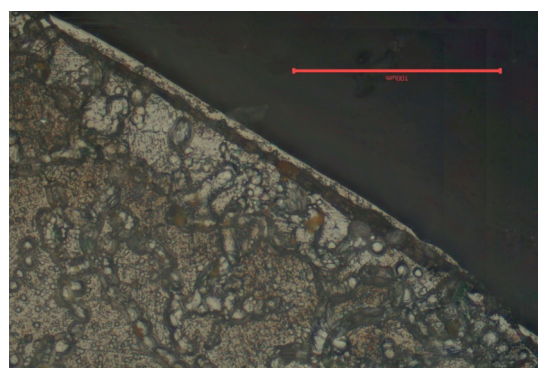
Таблица 2

## Шероховатость и микротвердость образцов после облучения

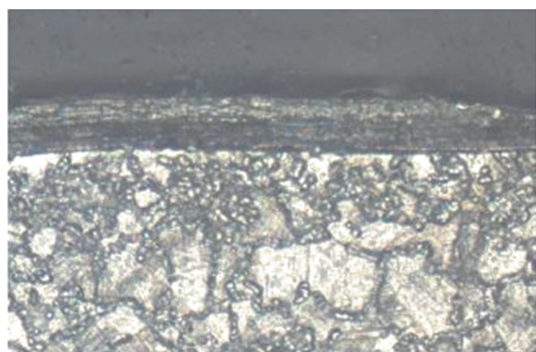
| № образца                 | Шероховатость $R_a$ , мкм | Толщина измененного слоя, мкм |                 |                   |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|
|                           |                           |                               | Облученный слой | Основной материал |
| <b>Установка РИТМ-СП</b>  |                           |                               |                 |                   |
| 2.4                       | 4,4                       | 7,1                           | 414             | 356               |
| 2.5                       | 4,2                       | 6,5                           | 430             | 378               |
| 2.6                       | 3,7                       | 8,2                           | 434             | 376               |
| <b>Установка ГЕЗА-ММП</b> |                           |                               |                 |                   |
| 1.10                      | 1,9                       | 26,8                          | 406             | 369               |
| 1.11                      | 1,8                       | 28,9                          | 435             | 362               |
| 1.12                      | 1,7                       | 44,5                          | 422             | 362               |



а



б

Рис. 2. Увеличение  $\times 500$ : а – образец № 2.4, микроструктура после облучения; б – образец № 1.10, микроструктура после облученияРис. 3. Увеличение  $\times 500$ : образец № 1.12, микроструктура после облучения

зоны, с составляющей общей глубиной более 44,5 мкм.

Опытные замеры модифицированного слоя при облучении на различных установках показали различие размера модифицированного измененного слоя. На установке РИТМ-СП он меньше в среднем в 3–4 раза. Облучение на опытно-промышленной установке ГЕЗА-ММП более интенсивно уменьшает шероховатость поверхности. Однако, судя по анали-

зу данных микротвердости, облучение на установке РИТМ-СП позволяет получить более однородный слой по всей поверхности образца. Следовательно, облучение с помощью СИЭП возможно использовать для постобработки деталей с дифференциацией по виду изделия. Тонкостенные детали со сложной геометрией предпочтительнее облучать установкой РИТМ-СП, а более массивные детали – опытно-промышленной установкой ГЕЗА-ММП. Также, варьируя в дальнейшем параметры при выборе режимов облучения, можно получить необходимый уровень шероховатости или микротвердости поверхностного слоя детали, произведенной методом селективного лазерного сплавления.

В ходе исследований удалось установить отсутствие в микроструктуре модифицированного слоя всех исследуемых образцов после облучения с помощью СИЭП трещин, образующихся при постобработке деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий традиционными методами (токарной и фрезерной). Установлено, что в облученном модифицированном слое отсутствуют границы треков и пористость.

Таблица 3

## Данные РСМА

| Спектр   | Распределение элементов |       |      |       |      |
|----------|-------------------------|-------|------|-------|------|
|          | Si                      | Cr    | Mn   | Co    | Mo   |
| Спектр 1 | 0,87                    | 21,44 | 0,32 | 59,75 | 7,39 |
| Спектр 2 | 0,75                    | 20,81 | 0,09 | 58,96 | 6,26 |
| Спектр 3 | 0,61                    | 21,44 | 0,32 | 54,71 | 5,27 |
| Спектр 4 | 0,64                    | 23,46 | 0,46 | 51,69 | 5,43 |

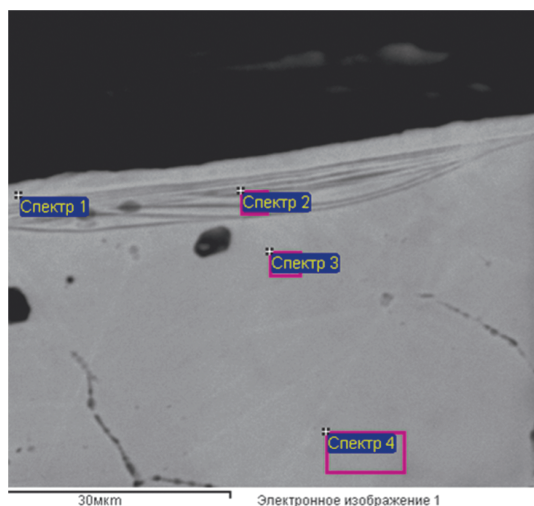


Рис. 4. Образец № 2.5: микроструктура поверхностного слоя

Исследование микроструктуры образцов с помощью РЭМ и РСМА показали, что в процессе облучения в поверхностном слое увеличивается концентрация таких элементов, как молибден и кремний (рис. 4, табл. 3).

Известно, что молибден является сильным карбидообразующим элементом, который уменьшает пористость, а его наличие обеспечивает повышение прочности за счет твердорастворного упрочнения. Повышение в поверхностном слое содержания кремния позволяет повысить жаростойкость сплава [19, 20].

Для подтверждения данной теории, на образцах была измерена микротвердость. Полученные данные показаны в табл. 2. Анализ табличных данных позволил сделать ряд выводов о влиянии импульсных электронных пучков на поверхность исследованных образцов из сплава системы CoCrMo. В средней части образца выявлено повышение микротвердости поверхностного слоя по отношению к краям (ближе к резу на полуцилиндры). Вид используемого для облучения оборудования не влияет на разницу этих результатов. Отмечается

также повышение микротвердости поверхности образцов на 20–25% в среднем вне зависимости от вида используемого оборудования. Опытным путем выяснено, что наиболее равномерные значения микротвердости поверхности всей модели получены на образце № 2.5 с режимом облучения  $W = 6,2 \pm 1,2 \text{ Дж/см}^2$ ,  $n = 45$ , с использованием установки РИТМ-СП.

## Выводы

1. На основе взаимоднозначной последовательности зависимостей для жаропрочных, никелевых и титановых сплавов, произведенных традиционными методами, предложены режимы облучения сильноточными импульсными электронными пучками кобальтохромовых сплавов, полученных с помощью аддитивных технологий (с использованием двух установок для облучения ГЕЗА-ММП и РИТМ-СП с различными выходными параметрами пучка).

2. Выявлена разница модификации поверхности: облучение импульсным электронным пучком модифицирует поверхность толщиной до 8 мкм на установке РИТМ-СП и свыше 44 мкм при облучении на установке ГЕЗА-ММП.

3. Изучена взаимозависимость режимов электронно-лучевой обработки и положительной динамики изменений важных критериев поверхности (микротвердость и шероховатость) образцов из сплава системы CoCrMo, полученных с помощью аддитивных технологий. Выявлено, что обработка импульсными электронными пучками уменьшает шероховатость поверхности: при облучении на ГЕЗА-ММП примерно на 70% и на РИТМ-СП – на 40%. Также удалось повысить микротвердость в среднем на 20–25%, что объясняется увеличением содержания молибдена в поверхностном слое.

4. Исследование показало, что импульсный электронный пучок значительно снижает трудоемкость обработки деталей и является высокоэффективным инструментом модификации поверхности образцов, изготовленных методом селективного лазерного сплавления из CoCrMo-сплава.

Результаты проведенных исследований показывают вектор дальнейшего совершенствования технологического процесса электронно-пучковой обработки деталей авиационных ГТД и определения эксплуатационных свойств кобальтохромовых сплавов, в том числе с помощью усталостных проб и жаростойких испытаний.

## Список источников

1. *Балякин А.В., Скуратов Д.Л., Хаймович А.И., Олейник М.А.* Применение прямого лазерного сплавления металлических порошков из жаропрочных сплавов в двигателестроении // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 3. С. 202–217. DOI: 10.34759/vst-2021-3-202-217
2. *Aykut Ş., Gölcü M., Semiz S., Ergür H.S.* Modeling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of satellite 6 using an artificial neural network // Journal of Materials Processing Technology. 2007. Vol. 190. No. 1–3, pp. 199–203. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.02.045
3. *Agarwal S.C., Ocken H.* The microstructure and galling wear of a laser-melted cobalt-base hardfacing alloy // Wear. 1990. Vol. 140. No. 2, pp. 223–233.
4. *Aykut Ş., Bağcı E., Kentli A., Yazıcıoğlu O.* Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool // Materials & Design. 2007. Vol. 28. No. 6, pp. 1880–1888. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.04.014
5. *Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T.* Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012. Vol. 57, pp. 83–101. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002
6. *Monroy K., Delgado J., Ciurana J.* Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process // Procedia Engineering. 2013. Vol. 63, pp. 361–369. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.227
7. *Marek I., Novák P., Mlynár J. et al.* Powder metallurgy preparation of Co-based alloys for biomedical applications // Acta Physica Polonica Series A. 2015. Vol. 128. No. 4, pp. 597–602. DOI: 10.12693/APhysPolA.128.597
8. *Смуrow И.Ю., Мовчан И.А., Ядройцев И.А. и др.* Аддитивное производство с помощью лазера. Проведение экспериментальных работ // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 1(18). С. 36–38.
9. *Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D.* Scaling roughness effects on pressure loss and heat transfer of additively manufactured channels // Journal of Turbomachinery. 2016. Vol. 139. No. 2. DOI: 10.1115/1.4034555
10. *Олейник М.А., Балякин А.В., Скуратов Д.Л., Петров И.Н., Мешков А.А.* Влияние режимов прямого лазерного выращивания на формообразование одиночных валиков и стенок из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 4. С. 243–255. DOI: 10.34759/vst-2022-4-243-255
11. *Yadroitsev I., Thivillon L., Bertrand Ph., Smurov I.* Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder // Applied Surface Science. 2007. Vol. 254. No. 4, pp. 980–983. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.08.046
12. *Балякин А.В., Носова Е.А., Олейник М.А.* Влияние термической обработки на структуру и свойства заготовок из жаропрочных никелевых сплавов, полученных по аддитивным технологиям // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 3. С. 209–219.
13. *Брыкин В.А., Рунецкий А.В., Коробов К.С.* Исследование пористости, морфологии микроструктуры и механических характеристик изделий, полученных селективной лазерной плавкой порошка сплава AlSi10Mg // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 2. С. 193–205. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180662>
14. *Дмитриева М.О., Мельников А.А., Носова Е.А., Кяримов Р.Р., Кржевицкий Г.Е.* Исследование формирования микроструктуры титанового сплава ВТ6 при изготовлении крыльчатки компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя методами аддитивных технологий // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 2. С. 196–203. DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203
15. *Быценко О.А., Филонова Е.В., Марков А.Б., Белова Н.А.* Влияние облучения сильноточными электронными пучками на поверхностные слои современных жаропрочных никелевых сплавов с ионно-плазменными покрытиями различного состава // Труды ВИАМ. 2016. № 6(42). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-10-10
16. *Поут Д.М., Фоти Г., Джекобсон Д.К. и др.* Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Пер. с англ. Н.К. Мышкина и др.; Под ред. А.А. Углова. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
17. *Sims C.T., Hagel W.C.* The Superalloys. – New York, John Wiley & Sons, 1972. – 614 p.
18. *Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C.* Production methods and application of high-quality metal powders for spraying and molding products // Stahl und Eisen. 2005. Vol. 125. No. 4, pp. 35–41.
19. *Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А. и др.* Разработка технологического процесса ремонта и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД из жаропрочной стали ЭП866Ш с применением сильноточных импульсных электронных пучков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 2(62). С. 23–27.
20. *Пайкин А.Г., Крайников А.В., Шулов В.А. и др.* Технологические основы модифицирования поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойким NiCrAlY покрытием с применением сильноточных импульсных электронных пучков // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 3. С. 56–60.



## References

1. Balyakin A.V., Skuratov D.L., Khaimovich A.I., Oleinik M.A. Direct laser fusion application for powders from heat resistant alloys in engine building. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 3, pp. 202-217. DOI: 10.34759/vst-2021-3-202-217
2. Aykut Ş., Gölcü M., Semiz S., Ergür H.S. Modeling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of satellite 6 using an artificial neural network. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 190, no. 1–3, pp. 199–203. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.02.045
3. Agarwal S.C., Ocken H. The microstructure and galling wear of a laser-melted cobalt-base hardfacing alloy. *Wear*, 1990, vol. 140, no. 2, pp. 223–233.
4. Aykut Ş., Bağcı E., Kentli A., Yazicioglu O. Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool. *Materials & Design*, 2007, vol. 28, no. 6, pp. 1880–1888. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.04.014
5. Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, vol. 57, pp. 83–101. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002
6. Monroy K., Delgado J., Ciurana J. Study of the pore formation on CoCrMo alloys by selective laser melting manufacturing process. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 63, pp. 361–369. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.227
7. Marek I., Novák P., Mlynár J. et al. Powder metallurgy preparation of Co-based alloys for biomedical applications. *Acta Physica Polonica Series A*, 2015, vol. 128, no. 4, pp. 597–602. DOI: 10.12693/APhysPolA.128.597
8. Smurov I.Yu., Movchan I.A., Yadroitsev I.A. et al. *Vestnik MGTU “Stankin”*, 2012, no. 1(18), pp. 36–38.
9. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. Scaling roughness effects on pressure loss and heat transfer of additively manufactured channels. *Journal of Turbomachinery*, 2016, vol. 139, no. 2. DOI: 10.1115/1.4034555
10. Oleinik M.A., Balyakin A.V., Skuratov D.L., Petrov I.N., Meshkov A.A. The effect of direct laser beam energy deposition modes on single rollers and walls shaping from the HN50VMTUB heat resisting alloy. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 4, pp. 243-255. DOI: 10.34759/vst-2022-4-243-255
11. Yadroitsev I., Thivillon L., Bertrand Ph., Smurov I. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder. *Applied Surface Science*, 2007, vol. 254, no. 4, pp. 980-983. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.08.046
12. Balyakin A.V., Nosova E.A., Oleinik M.A. Heat treatment effect on the structure and properties of workpieces from heat-resistant nickel alloys obtained by additive technologies. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 3, pp. 209-219.
13. Brykin V.A., Ripetskii A.V., Korobov K.S. Studying Porosity, Structure Morphology and Mechanical Characteristics of the Products Obtained by Selective Laser Melting of the AlSi10Mg Alloy Powder. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 2, pp. 193-205. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=180662>
14. Dmitrieva M.O., Mel'nikov A.A., Nosova E.A., Kyarimov R.R., Krzhevitskii G.E. Studying the VT16 titanium alloy microstructure forming while compressor impeller manufacturing of the small-sized gas turbine engine by additive technologies methods. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 196-203. DOI: 10.34759/vst-2023-2-196-203
15. Bytsenko O.A., Filonova E.V., Markov A.B., Belova N.A. *Trudy VIAM*, 2016, no. 6(42). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-10-10
16. Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C. *Surface modification and alloying by laser, ion, and electron beams*. Springer, Softcover reprint of the original 1st ed. 1983 edition (2013), 424 p.
17. Sims C.T., Hagel W.C. *The Superalloys*. New York, John Wiley & Sons, 1972, 614 p.
18. Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C. Production methods and application of high-quality metal powders for spraying and molding products. *Stahl und Eisen*, 2005, vol. 125, no. 4, pp. 35-41.
19. Shulov V.A., Paikin A.G., Bytsenko O.A. et al. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2010, no. 2(62), pp. 23-27.
20. Paikin A.G., Krainikov A.V., Shulov V.A. et al. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2008, no. 3, pp. 56-60.

Статья поступила в редакцию 26.08.2024; одобрена после рецензирования 04.09.2024; принята к публикации 09.09.2024.  
The article was submitted on 26.08.2024; approved after reviewing on 04.09.2024; accepted for publication on 09.09.2024.