

УДК 621.7-4+621.763

DOI 10.18698/0536-1044-2017-9-73-84

# Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства\*

Д.И. Сухов, С.В. Неруш, С.В. Беляков, П.Б. Мазалов

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, 105005, Москва, Российская Федерация, ул. Радио, д. 17

## The Research of Surface Roughness Parameters and Accuracy of Additive Manufacturing

D.I. Sukhov, S.V. Nerush, S.V. Belyakov, P.B. Mazalov

Federal State Unitary Enterprise All-Russian Research Institute for Aircraft Materials VIAM, 105005, Moscow, Russian Federation, Radio St., Bldg. 17

@ e-mail: viam.lab6@mail.ru, gidravlik2013@ya.ru

**i** Изготовление качественной продукции авиакосмического назначения методом селективного лазерного сплавления является актуальной задачей современного производства. Однако в научной литературе отсутствуют сведения для обоснованного выбора режимов сплавления с целью получения требуемого качества поверхности изделий и выполнения назначенных технических требований согласно конструкторской документации. В связи с этим проведены исследования, позволяющие раскрыть данную тематику. Представлены результаты испытаний влияния режимов селективного лазерного сплавления образцов, выполненных из порошка жаропрочного никелевого сплава ЭП648, на параметры качества поверхностного слоя. Получены зависимости высотных параметров шероховатости профиля от скорости сканирования лазерным лучом. Показано влияние расположения синтезируемого изделия относительно платформы построения на шероховатость поверхностного слоя. Выработаны технологические рекомендации по выбору режимов изготовления изделий ответственного назначения. Определена зависимость параметра шероховатости  $Rz$  от технологически выполняемого допуска на получаемый размер. Предложено теоретическое обоснование механизма возникновения скоплений сплавленных частиц на микрорельефе формируемой поверхности.

**Ключевые слова:** шероховатость поверхности, селективное лазерное сплавление, качество поверхностного слоя, аддитивные технологии, жаропрочный никелевый сплав, металлопорошковая композиция

**i** Production of high quality parts for the aerospace industry by selective laser melting is an important area of modern manufacturing. However, research literature does not have sufficient information for a justified selection of the melting modes to achieve the desired surface quality and fulfil the requirements specified by the design documentation. This study aims to further develop this topic. The results of the tests to determine the effect of selective laser melting modes on the quality parameters of the surface layer of are presented.

\* Работа выполнена в рамках по реализации комплексного научного направления № 10 «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций» «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г.» [1].

The tests are performed on samples made of the heat-resistant nickel alloy EP648. The dependencies of the height parameters of the profile roughness on the speed of laser beam scanning are obtained. The influence of the synthesized part location in relation to the substrate plate on the surface roughness is shown. Technological recommendations on the choice of manufacturing modes for crucial parts are developed. The dependency of the roughness parameter  $R_z$  on the technological allowance for the final size is determined. A theoretical explanation for the mechanism of melted particles accumulation on the microrelief of the obtained surface is proposed.

**Keywords:** surface roughness, selective laser melting, surface quality, additive manufacturing, nickel super alloy, metal powder composition

Согласно Национальной технологической инициативе (НТИ), в России до 2035 г. выбран курс на создание, развитие и продвижение передовых технологий, обеспечивающих приоритетные позиции отечественных компаний на формируемых глобальных рынках. Одно из ключевых направлений такой концепции — применение аддитивных технологий. В нашей стране наиболее изучаемым процессом аддитивного производства является процесс селективного лазерного сплавления (СЛС) металлопорошковых композиций.

Установки 3D-печати разных производителей отличаются друг от друга конструктивными решениями, параметрами (размерами камеры построения, скоростью сканирования лазерным лучом, типом лазера и его максимальной мощностью) и другими факторами, непосредственно влияющими на конечное формирование качества изготавливаемого изделия. Такой широкий разброс технических характеристик оборудования представляет собой особую технологическую проблему для получения нормируемой точности изготовления и шероховатости поверхности определенного диапазона значений.

Цель работы — исследование влияния параметров сплавления на качество поверхностного слоя и точность полученных изделий.

В качестве примера на рис. 1 приведены средние значения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  изделий, изготавливаемых из различных материалов на установках 3D-печати компаний EOS и SLM Solution при толщине спекаемого слоя  $\delta = 50$  мкм [2].

Из рис. 1 следует, что наилучший результат по шероховатости ( $R_a = 6$  мкм) получен при сплавлении порошкового слоя из алюминиевых сплавов компанией SLM Solution, а наихудший ( $R_a = 11...12$  мкм) — из титановых сплавов обоими производителями.

Исследования проблемы снижения шероховатости поверхности изделий аддитивного производства занимают в настоящее время значительный объем публикаций [3–7]. Например, авторы статьи [8] проанализировали методы последующей обработки поверхности — пескоструйную обработку (ПСО), химическое травление (ХТ), электрохимическую полировку — и их различные комбинации. Согласно данным экспериментов, проведенных над цилиндрическими образцами диаметром 10 мм и высотой 5 мм, выполненными из порошкового материала марки Ti-6Al-4V на оборудовании EOSINT M270, наилучшие результаты были получены после комбинированной обработки методами ПСО и ХТ. Среднее значение средне-

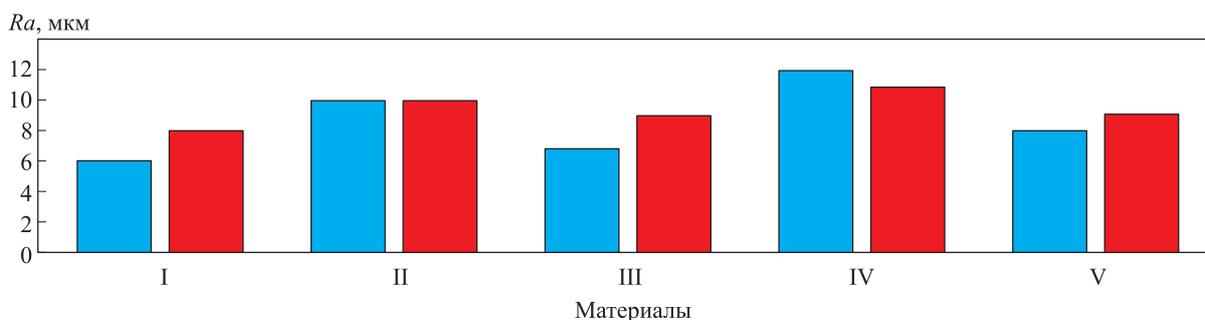


Рис. 1. Средние значения параметра шероховатости  $R_a$  поверхности изделий, изготавливаемых из различных материалов на установках 3D-печати компаний SLM Solution (■) и EOS (■) при толщине спекаемого слоя  $\delta = 50$  мкм:

I — Al-сплавы; II — Co-сплавы; III — Ni-сплавы; IV — Ti-сплавы; V — инструментальная и нержавеющая сталь

арифметического отклонения профиля варьировалось в пределах  $Ra = 4...5$  мкм. Средний размер частиц используемого песка при первом методе обработки составлял 200 мкм. При ХТ образцы погружали в раствор 20%-ной концентрированной азотной кислоты  $HNO_3$  с добавлением 2 % от общего объема получившегося реагента фтороводородной кислоты  $HF$  на 25 мин при комнатной температуре ( $25^\circ C$ ) и периодически взбалтывали в ходе процесса. Необходимо отметить, что после непосредственного изготовления образцов на установке 3D-печати (при режимах сплавления: мощность излучения лазерного луча  $P = 170$  Вт, скорость сканирования  $v = 1250$  мм/с,  $\delta = 30$  мкм, расстояние между треками  $L = 100$  мкм, стратегия сканирования — зигзагообразная под  $45^\circ$  между слоями) среднее значение параметра  $Ra$  находилось в интервале  $5,5...7$  мкм.

В работе [9] выполнен анализ влияния основных технологических факторов процесса СЛС на результат параметра шероховатости  $Rz$ . Исследуемыми материалами являлись медный порошок ПМС-1 (ГОСТ 4960–75) и кобальт-хром-молибденовый порошок DSK-F75. Процесс осуществлялся в защитной атмосфере аргона и азота поочередно при следующих режимах сплавления:  $P = 10...30$  Вт;  $v = 1,5...50$  мм/с;  $\delta = 30$  мкм;  $L = 100$  мкм. Установка для 3D-печати — собственного производства в виде опытного образца. По результатам исследования выявлено, что при изготовлении образцов из порошка медного сплава наибольшее влияние на качество получаемой поверхности оказывали факторы в следующей очередности:  $v \rightarrow P \rightarrow L$  (наилучшее значение параметра  $Rz = 260$  мкм), а при выполнении образцов из кобальт-хром-молибденового порошка —  $P \rightarrow v \rightarrow L$  (наилучшее значение параметра  $Rz = 450$  мкм).

В статье [10] разработан новый подход к назначению режимов изготовления изделий аддитивного производства, являющийся стандартным для традиционных методов изготовления деталей. Предложено *разделить процесс изготовления как минимум на два этапа — черновой и чистовой*. Этап чернового режима подразумевает более производительный процесс сплавления для формирования основного объема изделия. Этап чистового режима предназначен только для формирования его наружной поверхности.

Таким образом, задача исследования влияния технологических режимов сплавления на качество получаемых изделий представляет собой значительный интерес.

**Объект исследования и методика получения образцов.** В качестве объектов исследования применяли образцы, полученные из отечественного порошка высокохромистого жаропрочного никелевого сплава ЭП648 со следующим содержанием химических элементов, % масс: Cr —  $32...35$ ; Al —  $0,5...1,1$ ; Ti —  $0,5...1,1$ ; Nb —  $0,5...1,1$ ; Mo —  $2,3...3,3$ ; W —  $4,3...5,3$ ; C — до 0,1; Ni — остальное). Для экспериментов использовали порошок сферической формы основной фракции  $10...63$  мкм.

Образцы, представленные на рис. 2, изготовлены методом 3D-печати по технологии СЛС на установке Concept Laser M2 cusing (рис. 3). Установка содержит волоконный Yb-лазер с длиной волны 1069 нм и максимальной мощностью 400 Вт, работающий в непрерывном режиме. Процесс изготовления изделий включает в себя следующие этапы (без учета слесарных операций и постобработки): создание 3D-модели изделия в программе CAD;



Рис. 2. Образцы, изготовленные по технологии СЛС



Рис. 3. Установка для 3D-печати

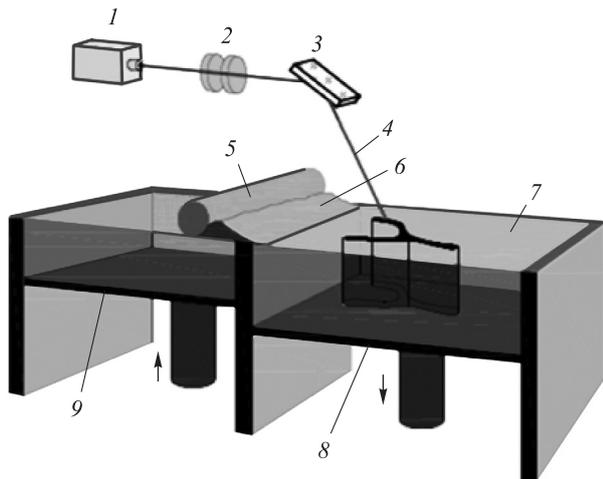


Рис. 4. Схема процесса сплавления каждого из слоев будущего изделия

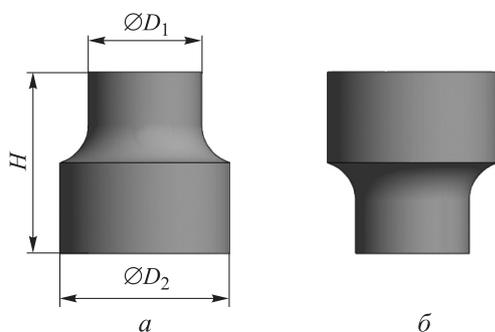


Рис. 5. Экспериментальные образцы Г1 (а) и Г2 (б)

формирование слоев изделия по высоте (толщина одного слоя для спекания  $\delta = 33$  мкм) и переход к формату .STL файла модели; загрузка файла в программную среду 3D-принтера; процесс послойного выращивания изделия.

Схема сплавления каждого из слоев будущего изделия приведена на рис. 4. Лазерный луч 4 источника излучения 1, проходя через оптическую систему 2–3, избирательно плавит порошок путем сканирования  $i$ -го поперечного сечения сгенерированной модели изделия формата .STL. По окончании сканирования платформа 8 с изготавливаемым изделием 7 опускается на заданную толщину (33 мкм), а платформа 9 с порошковым материалом поднимается. Рапель 5 предназначен для выравнивания и переноса слоя порошка 6 с «питающей» платформы 9. Процесс повторяется до тех пор, пока деталь полностью не будет изготовлена по высоте. Для предотвращения окисления и дальнейшего возможного возгорания порошка в камере построения применялась защитная атмосфера аргона.

При изготовлении 12 образцов разделили на две группы (по 6 шт. в каждой) в зависимости от

диаметра торца на платформе построения. В группу 1 (Г1) вошли образцы, выращивание которых проводилось с торца большего диаметра  $D_2 = 15$  мм, в группу 2 (Г2) — с торца меньшего диаметра  $D_1 = 10$  мм. Ориентация численной маркировки образцов указывает, к какой группе относится каждый из них. Маркировка и вид образцов представлены на рис. 5.

**Методика исследования.** Измерения шероховатости поверхности проводили по схеме, показанной на рис. 6, с помощью профилографа-профилометра ПРОФИ-130 (рис. 7). Длина трассировки составляла 8 мм согласно ГОСТ 2789–73, отсечка шага — 1 мм, диаметр используемого щупа — 5 мкм, а точность позиционирования алмазной иглы датчика — 0,01 мкм без бокового смещения. Каждый образец устанавливали в призму на измерительном столе прибора, закрепляли в заданном положении и последовательно выполняли по пять измерений шероховатости с поворотом образца на  $60^\circ$  для каждого последующего измерения и записью значений в соответствующий файл на жестком диске электронно-вычислительного устройства профилографа-профилометра.

Действие профилометра основано на принципе ощупывания неровностей измеряемой поверхности щупом — алмазной иглой 4 (см. рис. 6) в процессе перемещения вдоль измеряемой поверхности и последующего преобразования возникающих при этом вертикаль-

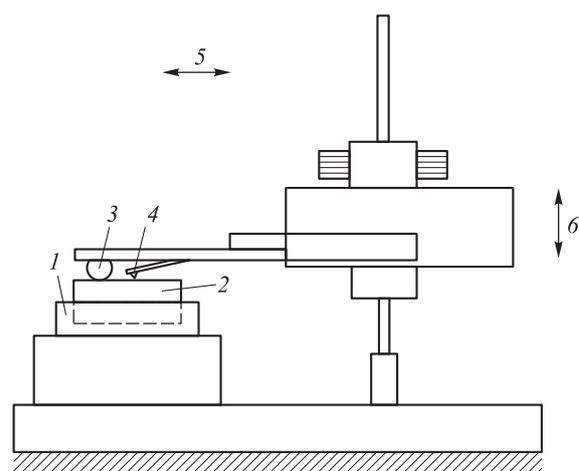


Рис. 6. Схема измерения шероховатости поверхности на профилографе-профилометре ПРОФИ-130:

1 — призматическая опора; 2 — образец для измерения; 3 — опора; 4 — алмазная игла; 5 — направление перемещения датчика с опорой; 6 — регулирование по высоте

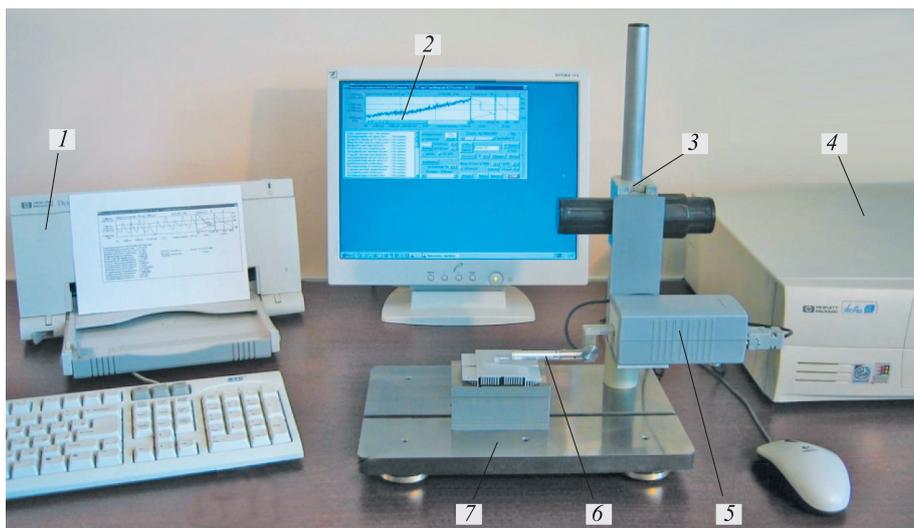


Рис. 7. Основные модули профилографа-профилометра ПРОФИ-130:  
 1 — принтер; 2 — монитор; 3 — стойка; 4 — компьютер под управлением операционной системы Windows XP;  
 5 — мотопривод; 6 — датчик; 7 — предметный столик

ных перемещений щупа в цифровой сигнал. Щуп встроен в блок датчика, который при сканировании ползет по поверхности образца своей опорой. Поэтому измерение профиля идет относительно опоры, представляющей собой твердосплавный полированный сегмент диска, неподвижно закрепленный на датчике.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.**

В настоящем исследовании сделана попытка анализа и выявления механизма формирования шероховатости на изделиях, получаемых методом СЛС. Испытуемые образцы изготавливали при следующих режимах сплавления контура:  $P = 195$  Вт,  $v = 800 \dots 1300$  мм/с,  $\delta = 33$  мкм,  $L = 105$  мкм, стратегия сканирования — «шахматная». Изучали влияние скорости сканиро-

вания на высотные параметры профиля шероховатости  $Ra$  и  $Rz$ . В ходе экспериментов скорость сканирования изменялась в указанном диапазоне. Регрессионные зависимости параметра шероховатости  $Ra$  поверхности образцов Г1 и Г2 от скорости сканирования показаны на рис. 8, а.

Как видно из рис. 8, а, кривые образцов Г1 и Г2 имеют одинаковый характер. Минимальные значения параметра шероховатости  $Ra$  поверхности образцов Г2 и Г1, полученные при  $v = 1100$  мм/с, составили соответственно 4,5 и 5,7 мкм. Для образцов Г2 при варьировании скорости сканирования в интервале 946...1200 мм/с параметр  $Ra$  находился в пределах 4,5...6,3 мкм, для образцов Г1 при  $v = 995 \dots 1170$  мм/с, параметр  $Ra = 5,7 \dots 6,$

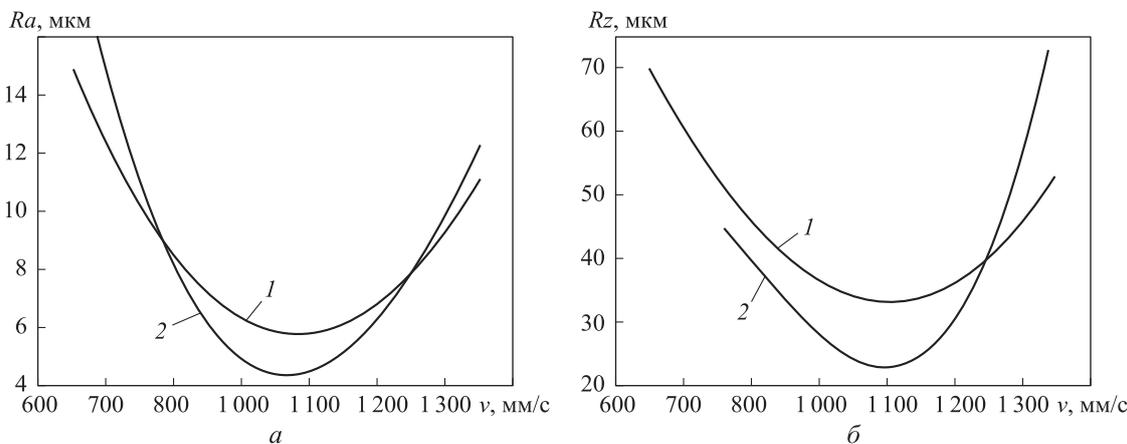


Рис. 8. Регрессионные зависимости параметров шероховатости  $Ra$  (а) и  $Rz$  (б) поверхности образцов Г1 (1) и Г2 (2) от скорости сканирования  $v$

3 мкм. Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить уравнения регрессии, описывающие зависимость среднеарифметического отклонения профиля от скорости сканирования:

- для образцов Г1

$$Ra(v) = 115,25455 - 0,21772v + 1,21881 \cdot 10^{-4}v^2 - 1,31481 \cdot 10^{-8}v^3;$$

- для образцов Г2

$$Ra(v) = 250,59389 - 0,55974v + 4,00369 \cdot 10^{-4}v^2 - 8,62963 \cdot 10^{-8}v^3.$$

Исследования зависимости высоты неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$  от скорости сканирования также проводили в интервале  $v = 800 \dots 1300$  мм/с. Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить уравнения регрессии:

- для образцов Г1

$$Rz(v) = 306,92222 - 0,39109v + 3,65476 \cdot 10^{-5}v^2 + 8,42593 \cdot 10^{-8}v^3;$$

- для образцов Г2

$$Rz(v) = -688,64 + 2,6406v - 0,00303v^2 + 1,10833 \cdot 10^{-6}v^3.$$

Регрессионные зависимости параметра шероховатости  $Rz$  от скорости сканирования показаны на рис. 8, б.

Для изделий общемашиностроительного применения высотный параметр  $Rz$  хорошо согласуется с параметром  $Ra$  с помощью переводного коэффициента  $k$ , который обычно варьируется в интервале  $k = 4 \dots 5$  [11] и определяется по формуле

$$k = \frac{Rz}{Ra}.$$

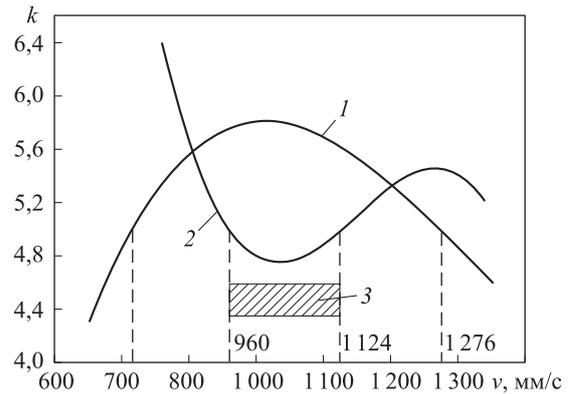


Рис. 9. Зависимость коэффициента  $k$  от скорости сканирования  $v$  для образцов Г1 (1) и Г2 (2): 3 — область режимов по скорости для изготовления деталей типа Г2 ответственного назначения

Регрессионные зависимости коэффициента  $k$  от скорости сканирования для образцов Г1 и Г2 показаны на рис. 9.

Анализ данных, полученных в ходе измерений, показал, что графики зависимостей коэффициента  $k$  от скорости сканирования для образцов Г1 и Г2 имеют совершенно разный характер. У образцов Г1 в диапазоне  $v = 800 \dots 1276$  мм/с коэффициент  $k > 5$ , что не соответствует требованиям, предъявляемым ко многим изделиям общемашиностроительного и авиационного применения, поэтому такие режимы нельзя использовать для изготовления изделий ответственного назначения. Следует отметить, что при скоростях  $v < 800$  м/с и  $v > 1276$  м/с коэффициент  $k < 5$ , что дает возможность рассматривать дальнейшую отработку режимов изготовления образцов Г1 в указанном диапазоне скоростей.

У образцов Г2 коэффициент  $k = 4 \dots 5$  при  $v = 960 \dots 1124$  мм/с, что определяет границы их функционального применения при таких ре-

#### Технологические рекомендации для назначения режимов изготовления изделий из материала ЭП648

Группа деталей	Режимы сплавления: $P = 195$ Вт, $\delta = 33$ мкм, стратегия сканирования — «шахматная», $L = 105$ мкм	
	Интервал скорости $v$ , мм/с	
Г1 (синтез изделия от большего диаметра к меньшему)	800...1300 — поверхность деталей не пригодна для условий ответственного назначения	995...1170 — поверхность деталей пригодна для их применения в общемашиностроительных целях
Г2 (синтез изделия от меньшего диаметра к большему)	960...1124 — поверхность деталей пригодна для условий ответственного назначения	946...1200 — то же

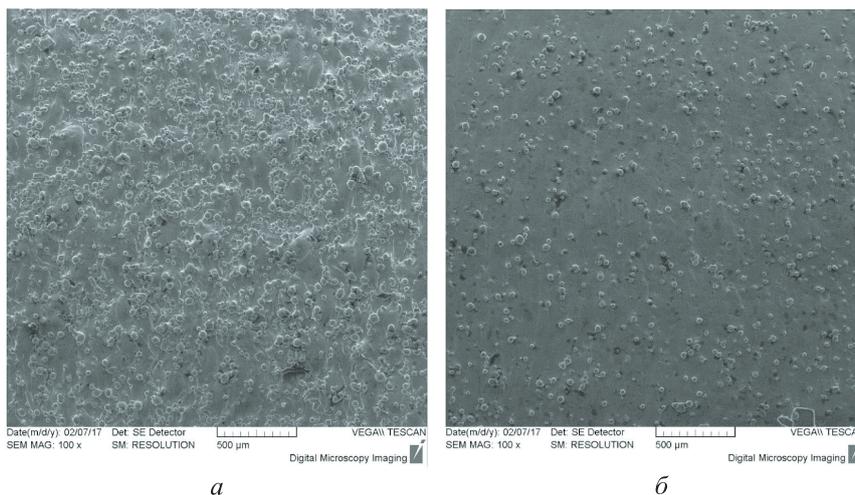


Рис. 10. Фотография поверхности образцов с разными значениями параметра шероховатости: а —  $Ra = 10$  мкм; б —  $Ra = 6$  мкм

жимах для изготовления деталей ответственно-го назначения. При  $v = 960$  мм/с параметр  $Ra$  равен 5,8 мкм, а при  $v = 1\ 124$  м/с — 4,7 мкм.

На основании изложенного разработаны технологические рекомендации для назначения режимов изготовления деталей по критериям качества поверхностного слоя (см. таблицу).

На рис. 10 показана фотография поверхности двух полученных образцов при увеличении  $\times 100$ .

При сравнении поверхностей образцов с параметрами шероховатости  $Ra = 10$  мкм и  $Ra = 6$  мкм (см. рис. 10) видно, что частицы порошка на поверхности присутствуют в обоих случаях, но при  $Ra = 6$  мкм их значительно меньше. Однако главное их различие заключается в состоянии поверхностного слоя: у образца с параметром шероховатости  $Ra = 6$  мкм поверхность более гладкая. В этом выражается влияние режима для контура на поверхность, и она выгла-

дит переплавленной. Низкая энергия (обусловленная высокими скоростями сканирования) на контуре также приводит к неоптимальным результатам (см. рис. 8, правые части кривых).

При измерении точности размеров  $D_2$  и  $D_1$  получены их средние отклонения  $E_{D_2}$  и  $E_{D_1}$  от номинальных значений  $D_{2\text{ ном}} = 15,00$  мм и  $D_{1\text{ ном}} = 10,00$  мм в зависимости от скорости сканирования (рис. 11).

Анализ результатов измерений показал следующее:

- для поверхности диаметром  $D_2$  образцов Г1 при  $v = 1\ 100$  мм/с поле допуска получаемого размера (ПДПР) имеет характер поверхности типа «вал», при остальных значениях скорости сканирования — характер «отверстия». Минимальное значение отклонения размера поверхности  $D_2$  составило 15 мкм, что по точности выполнения размера соответствует качеству 6, а максимальное — 65 мкм (качество 9);

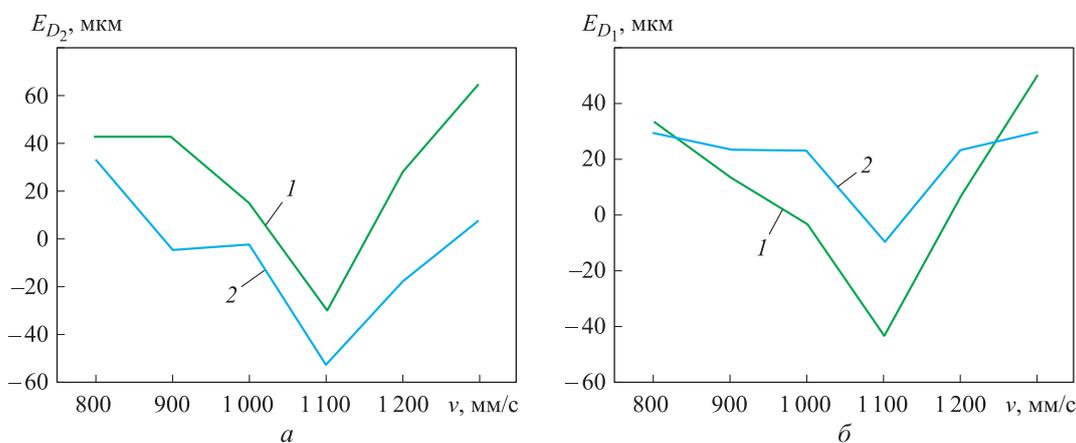


Рис. 11. Влияние скорости сканирования  $v$  на средние отклонения  $E_{D_2}$  (а) и  $E_{D_1}$  (б)

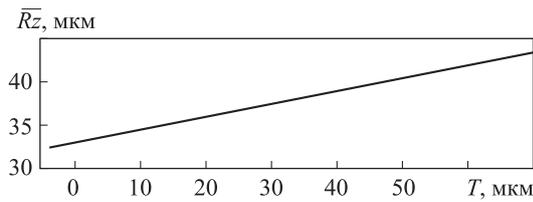


Рис. 12. Регрессионная зависимость среднего значения параметра шероховатости  $Rz$  от технологического допуска  $T$

- для поверхности диаметром  $D_2$  образцов Г2 при  $\nu = 900 \dots 1200$  мм/с ПДПР имеет характер поверхности типа «вал», при остальных значениях  $\nu$  — характер «отверстия». Минимальное значение отклонения размера поверхности  $D_2$  составило 3 мкм (квалитет 3), максимальное — 52 мкм (квалитет 9);

- для поверхности диаметром  $D_1$  образцов Г1 при  $\nu = 1000 \dots 1100$  мм/с ПДПР имеет характер поверхности типа «вал», при остальных значениях  $\nu$  — характер «отверстия». Минимальное значение отклонения размера поверхности  $D_1$  составило 4 мкм (квалитет 3), максимальное — 50 мкм (квалитет 9);

- для поверхности диаметром  $D_1$  образцов Г2 при  $\nu = 1100$  мм/с ПДПР имеет характер поверхности типа «вал», при остальных значениях  $\nu$  — характер «отверстия». Минимальное значение отклонения размера поверхности  $D_1$  составило 10 мкм (квалитет 5), максимальное — 30 мкм (квалитет 8).

Математическая обработка экспериментальных данных в диапазоне скорости  $\nu = 800 \dots 1300$  мм/с позволила получить уравнение регрессии для образцов Г1 и Г2, описывающее зависимость среднего значения  $\overline{Rz}$  высоты неровностей профиля по 10 точкам от технологического допуска  $T$  выполнения размера

$$\overline{Rz}(T) = 32,82 + 0,15T.$$

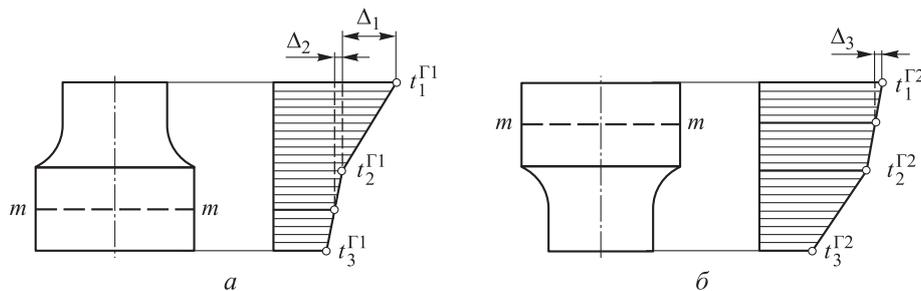


Рис. 13. Эпюры распределения температуры поверхности образцов Г1 (а) и Г2 (б) по высоте:  $t_1^{\Gamma 1}$ ,  $t_2^{\Gamma 1}$ ,  $t_3^{\Gamma 1}$  и  $t_1^{\Gamma 2}$ ,  $t_2^{\Gamma 2}$ ,  $t_3^{\Gamma 2}$  — температуры на уровне 1-, 2-, 3-го сечений образцов Г1 и Г2 соответственно

Регрессионная зависимость среднего значения параметра шероховатости  $Rz$  от технологического допуска  $T$  показана на рис. 12.

Проанализируем причины возникновения участков слипшихся частиц порошка на уже спеченной поверхности детали [3–7, 12–15]. На рис. 13 изображены эпюры распределения температуры образцов Г1 и Г2.

Согласно уравнению Фурье [9], получим количество теплоты, которое проходит через сечение  $m-m$  диаметра  $D_2$ :

- для образцов Г1

$$\begin{aligned} Q^{\Gamma 1} &= Q_{D_1} + Q_{m-m} = \\ &= \frac{\lambda}{z}(t_1 - t_2^{\Gamma 1})F_1 + \frac{\lambda}{z/2}(t_2^{\Gamma 1} - t_{m-m}^{\Gamma 1})F_2 = \\ &= \{F_2 = 2,25F_1\} = \\ &= \frac{\lambda}{z}[(t_1 - t_2^{\Gamma 1})F_1 + 4,5(t_2^{\Gamma 1} - t_{m-m}^{\Gamma 1})F_1] = \\ &= \frac{\lambda}{z}F_1[\Delta_1 + 4,5\Delta_2]; \end{aligned}$$

- для образцов Г2

$$\begin{aligned} Q^{\Gamma 2} &= Q_{m-m} = \frac{\lambda}{z/2}(t_1 - t_{m-m}^{\Gamma 2})F_2 = \\ &= 4,5 \frac{\lambda}{z}(t_1 - t_{m-m}^{\Gamma 2})F_1 = 4,5 \frac{\lambda}{z}F_1\Delta_3, \end{aligned}$$

где  $Q_{D_1}$  — количество теплоты, которое прошло до уровня перехода между поверхностями диаметрами  $D_1$  и  $D_2$ , Дж;  $Q_{m-m}$  — количество теплоты, которое прошло до уровня сечения  $m-m$ , Дж;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К;  $z$  — координата сечения поверхности относительно уровня 1-го сечения, м;  $t_1 = t_1^{\Gamma 1} = t_1^{\Gamma 2}$  — температура на уровне 1-го сечения (принимаем равной для обеих групп образцов), К;  $F_1$  и  $F_2$  — площадь поперечного сечения поверхности диаметром  $D_1$  и  $D_2$ , м<sup>2</sup>;  $t_{m-m}^{\Gamma 1}$  и  $t_{m-m}^{\Gamma 2}$  — температура на уровне

сечения  $m$ - $m$  образцов Г1 и Г2, К;  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$  — разница температур на эюре, К,  $\Delta_1 = (t_1 - t_2^{\Gamma 1})$ ,  $\Delta_2 = (t_2^{\Gamma 1} - t_m^{\Gamma 1})$ ,  $\Delta_3 = (t_1 - t_m^{\Gamma 2})$ .

С учетом того, что  $\Delta_2 = \Delta_3$  (см. рис. 13) имеем

$$Q^{\Gamma 1} > Q^{\Gamma 2}.$$

Это означает, что у образцов Г1 количество теплоты  $Q^{\Gamma 1}$ , которое проходит через сечение на уровне срединной линии  $m$ - $m$  диаметра  $D_2$  за все время их изготовления, больше, чем аналогичное количество теплоты  $Q^{\Gamma 2}$  у образцов Г2. В качестве предположения можно заключить, что часть порошка, находящаяся в области построения детали, испытывает большой поток отвода теплоты с ее поверхности, что способствует оплавлению поверхностей частиц порошка. С учетом вибрации узла опускания платформы оплавленные частицы при контакте с поверхностью детали образуют микросварное соединение.

## Выводы

1. В ходе проведенных исследований получены зависимости параметров шероховатости  $Ra$  и  $Rz$  от скорости сканирования.

2. Проанализирован диапазон изменения коэффициента  $k$ , а также его зависимость от скорости сканирования для выращенных деталей аддитивного производства; выявлен разный характер поведения графиков коэффициента  $k$  в зависимости от конкретной группы деталей.

3. Установлено влияние скорости сканирования на отклонение получаемого размера от номинального.

4. Приведена зависимость между параметром  $Rz$  и технологически обеспечиваемым допуском размера, что позволяет в дальнейшем выработать подход к назначению технических требований на детали аддитивного производства.

5. Выдвинута гипотеза механизма образования участков сплавленных частиц на поверхности создаваемого изделия. Показано, что количество теплоотвода на уровне срединной поверхности диаметра  $D_2$  зависит от ориентации образца.

6. Установлены режимы для изготовления поверхностей деталей ответственного назначения из порошка жаропрочного сплава ЭП648.

## Литература

- [1] 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, с. 3–33.
- [2] *EOS MaragingSteel MS1*. URL: [http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS\\_MaragingSteel\\_MS1\\_en.pdf](http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf) (дата обращения 15 марта 2017).
- [3] 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. URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/648.pdf> (дата обращения 10 марта 2017), doi: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1.
- [4] Евгенов А.Г., Неруш С.В., Василенко С.А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке. *Труды ВИАМ*, 2014, № 5. URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/664.pdf> (дата обращения 12 марта 2017), doi: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4.
- [5] Неруш С.В., Евгенов А.Г., Ермолаев А.С., Роголев А.М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD-наплавки. *Вопросы материаловедения*, 2013, № 4(76), с. 98–107.
- [6] Лаптева М.А., Белова Н.А., Раевских А.Н., Филонова Е.В. Исследование зависимости шероховатости, морфологии поверхности и количества дефектов структуры от мощности лазера, скорости сканирования и типа штриховки в жаропрочном сплаве, син-

- тезированном методом СЛС. *Труды ВИАМ*, 2016, № 9. URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1009](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1009) (дата обращения 12 марта 2017), doi: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-9-9.
- [7] Семенов А.Б., Гавриленко А.Э., Семенов Б.И. Порошковые технологии синтеза сложных фасонных деталей из суперсплавов: АМ и/или PIM (зарубежный и отечественный опыт). *Аддитивные технологии: настоящее и будущее. Матер. II Междунар. конф.*, 16 марта 2016, Москва, ВИАМ, 2016. 47 с.
- [8] Longhitano G.A., Larosa M.A., Munhoza A.L.J., Carvalho Zavaglia C.A., Ierardia M.C.F. Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering. *Materials Research*, 2015, vol. 18(4), pp. 838–842.
- [9] Сапрыкина Н.А. *Совершенствование технологии формирования поверхностного слоя изделий, полученных послойным лазерным спеканием*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, ТюмГНГУ, 2013. 20 с.
- [10] Сапрыкина Н.А., Сапрыкин А.А. Понятие режимов лазерного спекания порошковых материалов. *Вестник КузГТУ*, 2010, № 3, с. 49–52.
- [11] Косилова А.Г., Мещерякова Р.К., ред. *Справочник технолога машиностроителя*. В 2 т. Т. 1. Москва, Машиностроение, 1985. 655 с.
- [12] Каблов Е.Н. Что такое инновации. *Наука и жизнь*, 2011, № 11, с. 16–21.
- [13] Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*, 2013, № 3, с. 47–54.
- [14] Каблов Е.Н. *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. Москва, ВИАМ, 2015. 557 с.
- [15] Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков. *Труды ВИАМ*, 2015, № 2. URL: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/772.pdf> (дата обращения 23 марта 2016), doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.

## References

- [1] Kablov E.N. Innovatsionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNTs RF po realizatsii «Strategicheskikh napravlenii razvitiia materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda» [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, pp. 3–33.
- [2] *EOS MaragingSteel MS1*. Available at: [http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS\\_MaragingSteel\\_MS1\\_en.pdf](http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/1af123af9a636e61/042696652ecc69142c8518dc772dc113/EOS_MaragingSteel_MS1_en.pdf) (accessed 15 March 2017).
- [3] Nerush S.V., Evgenov A.G. Issledovanie melkodispersnogo metallichesкого poroshka zharochnogo splava marki EP648-VI primenitel'no k lazernoj LMD-naplavke, a takzhe otsenka kachestva naplavki poroshkovogo materiala na nikel'noi osnove na rabochie lopatki TVD [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. Available at: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/648.pdf> (accessed 10 March 2017), doi: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-1-1.
- [4] Evgenov A.G., Nerush S.V., Vasilenko S.A. Poluchenie i oprobovanie melkodispersnogo metallichesкого poroshka vysokokhromistogo splava na nikel'noi osnove primenitel'no k lazernoj LMD-naplavke [The obtaining and testing of the fine-dispersed metal powder of the high-chromium alloy on nickel-base for laser metal deposition]. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2014, no. 5. Available at: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/664.pdf> (accessed 12 March 2017), doi: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-4-4.

- [5] Nerush S.V., Evgenov A.G., Ermolaev A.S., Rogalev A.M. Issledovanie melkdispersnogo metallichesкого poroshka zharoprochnogo splava na nikelevoi osnove dlia lazernoi LMDnaplavki [A study of the fine metal powder heat-resistant nickel-based alloy for laser LMDsurfacing]. *Voprosy materialovedeniia* [Materials Questions]. 2013, no. 4(76), pp. 98–107.
- [6] Lapteva M.A., Belova N.A., Raevskikh A.N., Filonova E.V. Issledovanie zavisimosti shero-khovatosti, morfologii poverkhnosti i kolichstva defektov struktury ot moshchnosti lazera, skorosti skanirovaniia i tipa shtrikhovki v zharoprochnom splave, sintezirovannom metodom SLS [Dependence of roughness, surface morphology structure and number of defects on the power of the laser, scanning speed and the type of hatching in the high-temperature alloys synthesized by SLS]. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2016, no. 9. Available at: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1009](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1009) (accessed 12 March 2017), doi: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-9-9.
- [7] Semenov A.B., Gavrilenko A.E., Semenov B.I. Poroshkovye tekhnologii sinteza slozhnykh fasonnykh detalei iz supersplavov: AM i/ili PIM (zarubezhnyi i otechestvennyi opyt) [Powder synthesis technology of complex shaped parts made of superalloys: AM and/or PIM (foreign and domestic experience)]. *Additivnye tekhnologii: nastoiashchee i budushchee: mater. 2 Mezhdunar. konf.* [Additive technology: present and future: materials of the 2 International conference]. 16 marta 2016, Moscow, VIAM, 2016, 47 p.
- [8] Longhitano G.A., Larosa M.A., Munhoza A.L.J., Carvalho Zavaglia C.A., Ierardia M.C.F. Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering. *Materials Research*, 2015, vol. 18(4), pp. 838–842.
- [9] Saprykina N.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii formirovaniia poverkhnostnogo sloia izdelii, poluchennykh posloinym lazernym spekaniem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the technology of forming the surface layer of the products obtained by layer-by-layer laser sintering. Abstract diss. cand. tech. sci.]. Tyumen, TyumGNGU publ., 2013. 20 p.
- [10] Saprykina N.A., Saprykin A.A. Poniatie rezhimov lazernogo spekaniia poroshkovykh materialov [The concept of modes of laser sintering of powder materials]. *Vestnik KuzGTU* [Vestnik of Kuzbass State Technical University]. 2010, no. 3, pp. 49–52.
- [11] *Spravochnik tekhnologa mashinostroitelia* [Directory technologist mechanical engineer]. Ed. Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K. In 2 vol. Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985. 655 p.
- [12] Kablov E.N. Chto takoe innovatsii [What is innovation]. *Nauka i zhizn'* [Science and life]. 2011, no. 11, pp. 16–21.
- [13] Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S., Sidorov V.V. Prioritetnye napravleniia razvitiia tekhnologii proizvodstva zharoprochnykh materialov dlia aviatsionnogo dvigatelestroeniia [The priority directions of superalloys technologies development for aviation engine production]. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniia* [Problems of Ferrous Metallurgy and Materials Science]. 2013, no. 3, pp. 47–54.
- [14] Kablov E.N. *Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiia Rossii* [Trends and benchmarks of innovation development of Russia]. Moscow, FSUE VIAM publ., 2015. 557 p.
- [15] Evgenov A.G., Rogalev A.M., Nerush S.V., Mazalov I.S. Issledovanie svoistv splava EP648, poluchennogo metodom selektivnogo lazernogo splavleniia metallicheskiikh poroshkov [A study of properties of EP648 alloy manufactured by the selective laser sintering of metal powders]. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM]. 2015, no. 2. Available at: <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/772.pdf> (accessed 23 March 2016), doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.

Статья поступила в редакцию 24.04.2017

## Информация об авторах

**СУХОВ Дмитрий Игоревич** (Москва) — начальник сектора материаловедения лаборатории 606. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (105005, Москва, Российская Федерация, ул. Радио, д. 17, e-mail: viam.lab6@mail.ru).

**НЕРУШ Святослав Васильевич** (Москва) — начальник лаборатории 616. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (105005, Москва, Российская Федерация, ул. Радио, д. 17, e-mail: viam.lab6@mail.ru).

**БЕЛЯКОВ Сергей Владимирович** (Москва) — инженер лаборатории 606. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (105005, Москва, Российская Федерация, ул. Радио, д. 17, e-mail: gidravlik2013@ya.ru).

**МАЗАЛОВ Павел Борисович** (Москва) — начальник лаборатории 606. ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ (105005, Москва, Российская Федерация, ул. Радио, д. 17, e-mail: viam.lab6@mail.ru).

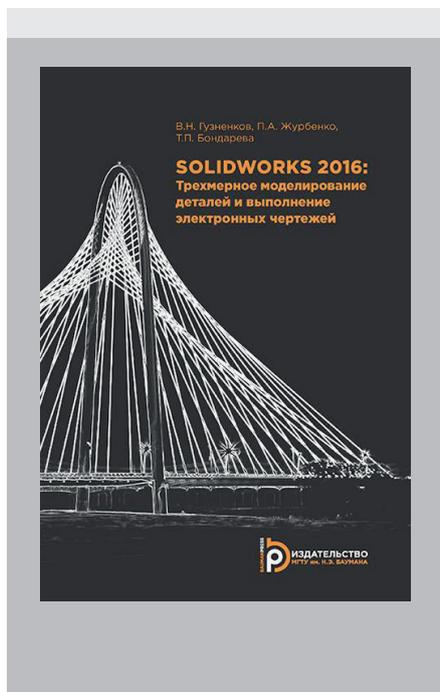
## Information about the authors

**SUKHOV Dmitriy Igorevich** (Moscow) — Head of Materials Science Section, Laboratory 606. Federal State Unitary Enterprise All-Russian Research Institute for Aircraft Materials VIAM (105005, Moscow, Russian Federation, Radio St., Bldg. 17, e-mail: viam.lab6@mail.ru).

**NERUSH Svyatoslav Vasilievich** (Moscow) — Head of Laboratory 616. Federal State Unitary Enterprise All-Russian Research Institute for Aircraft Materials VIAM (105005, Moscow, Russian Federation, Radio St., Bldg. 17, e-mail: viam.lab6@mail.ru).

**BELYAKOV Sergey Vladimirovich** (Moscow) — Engineer, Laboratory 606. Federal State Unitary Enterprise All-Russian Research Institute for Aircraft Materials VIAM (105005, Moscow, Russian Federation, Radio St., Bldg. 17, e-mail: gidravlik2013@ya.ru).

**MAZALOV Pavel Borisovich** (Moscow) — Head of Laboratory 606. Federal State Unitary Enterprise All-Russian Research Institute for Aircraft Materials VIAM (105005, Moscow, Russian Federation, Radio St., Bldg. 17, e-mail: viam.lab6@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие

### **В.Н. Гузенкова, П.А. Журбенко, Т.П. Бондаревой** **«SolidWorks 2016. Трехмерное моделирование** **деталей и выполнение электронных чертежей»**

Рассмотрены вопросы, связанные с использованием системы автоматизированного проектирования SolidWorks в курсе «Инженерная графика»: построение электронных геометрических моделей и выполнение электронных чертежей деталей.

Издание подготовлено с учетом требований государственных стандартов Единой системы конструкторской документации на основе опыта преподавания дисциплины «Компьютерная графика» на кафедре «Инженерная графика» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов высших технических учебных заведений.

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru