



# Особенности получения качественных изделий из титановых сплавов, изготовленных технологией прямого лазерного выращивания

М. О. Гущина, О. Г. Климова-Корсмик<sup>1</sup>, С. А. Шальнова, А. М. Вильданов, Е. А. Валдайцева

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, [www.smtu.ru](http://www.smtu.ru), Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> [o.klimova@ltc.ru](mailto:o.klimova@ltc.ru)

Аддитивная технология прямого лазерного выращивания (ПЛВ) относится к классу методов 3D печати металлических изделий. Она является перспективной для изготовления крупногабаритных сложнопольных изделий авиационной и судостроительной промышленности. Методы аддитивного производства диктуют серьезные требования к свойствам используемых порошков, но при правильном выборе системы и с учетом всех процессов, протекающих при воздействии выбранного источника на порошковые материалы, можно добиться уникальных индивидуальных свойств материала. В данной работе представлены результаты исследований влияния качества порошков, качества атмосферы и технологических режимов процесса на структуру и свойства конечных изделий, изготовленных методом прямого лазерного выращивания из титанового сплава ВТ6. Кроме того, показана принципиальная возможность повторного использования титановых порошков для достижения более высоких экономических показателей процесса.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, прямое лазерное выращивание, титановый сплав, свойства порошков, защитная атмосфера, параметры процесса, вторичный порошок

Статья поступила: 07.10.2019. Принята к публикации: 28.10.2019.

## Peculiarities of Obtaining High-Quality Products of Titanium Alloys Manufactured by Direct Laser Deposition Technology

M. O. Gushchina, O. G. Klimova-Korsmik<sup>1</sup>, S. A. Shalnova, A. M. Vildanov, E. A. Valdaytseva

St. Petersburg State Marine Technical University, [www.smtu.ru](http://www.smtu.ru), St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup> [o.klimova@ltc.ru](mailto:o.klimova@ltc.ru)

The additive technology of direct laser deposition (DLD) belongs to the class of 3D printing methods for metal parts and constructions. It is promising for the manufacture of large-sized complex parts for the aviation and shipbuilding industries. Methods of additive production dictate serious requirements for the properties of building powders, but with the right choice of system and taking into account all the processes that occur when a selected source acts on powder materials, unique individual material properties can be achieved. In this work, the influence of powder quality, protect atmosphere as well as processing parameters on the structure and properties of deposited parts manufactured Ti-6Al-4V was investigated. In addition, it was shown the fundamental possibility of using recycled titanium powders to achieve higher economic performance of the process.



**Keywords:** additive technologies, direct laser deposition, titanium alloy, powder properties, protect atmosphere, processing parameters, reused powder

Received: 07.10.2019. Accepted: 28.10.2019.

## ВВЕДЕНИЕ

Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) является наиболее перспективной технологией для внедрения аддитивного производства крупногабаритных металлических изделий во многие отрасли промышленности [1-4]. Данная технология позволяет создавать детали сложной формы и конструкции за один технологический этап без использования дополнительного оборудования. Для сплавов на основе титана производительность составляет порядка 1,0-1,5 кг/час, а для сплавов на основе железа, кобальта, никеля – 1,5-2,0 кг/час. Типичный коэффициент использования материала для крупногабаритных деталей составляет 0,7-0,9. Полная автоматизация позволяет повысить эффективность процесса в 10 раз и снижает стоимость изготовления деталей в 3-5 раз. Однако для получения качественных изделий стоит выбирать предельно аккуратно параметры процесса и последующую обработку.

Процесс прямого лазерного выращивания (ПЛВ) является многопараметрическим, и влияние некоторых параметров зачастую является критическим. Для внедрения технологии в реальные промышленные условия необходимо максимально учесть влияние не только технологических параметров, таких как мощность, скорость, диаметр пятна, расход порошка и т.д., но и такие важные параметры, как качество порошка, качество защитной атмосферы, влияние остаточных напряжений и их распределение по всему объему изделия. Особенно важной задачей при изготовлении изделий методом прямого лазерного выращивания является учет остаточных напряжений, которые будут увеличиваться с увеличением количества слоев, с изменением параметров процесса. С добавлением новых слоев на ранее построенные слои растягивающее напряжение преобразуется в сжимающие вследствие последующего вынужденного термоциклирования [5]. Еще одной важной задачей в области развития аддитивной технологии прямого лазерного выращивания является подбор режимов термической обработки, которые будут нивелировать негативные особенности процесса, такие как остаточные напряжения, анизотропия и метастабильные фазы, характерные для технологий и оборудования на основе высоконцентрированных источников энергии. Кроме выше перечисленного, остро стоит

вопрос использования вторичного сырья в виде порошка, который не попадает в ванну расплава в процессе выращивания. Таким образом, даже при коэффициенте захвата порошка до 70% большое количество дорогостоящего титанового порошка остается не использованным, поэтому проведение исследований по влиянию повторно используемого порошка на свойства изделий актуально в области аддитивных технологий.

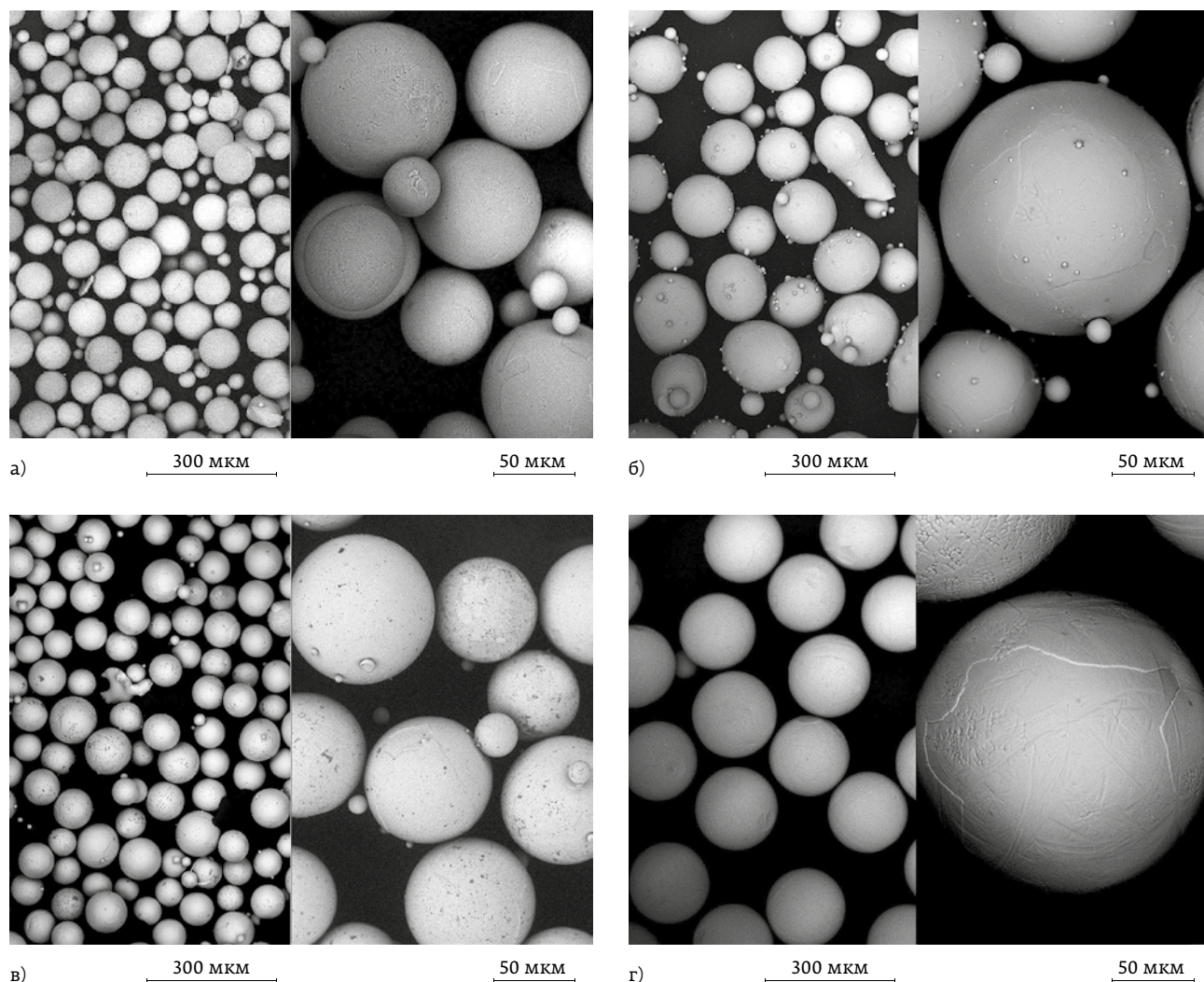
В данной статье представлены результаты исследований по влиянию различных параметров технологии прямого лазерного выращивания на свойства изделий, получаемых из сферических порошков двухфазного титанового сплава ВТ6. Приведены основные характеристики структуры, формируемой в процессе выращивания. Показано влияние качества атмосферы и исходных порошков на структуру и свойства изделий. Представлены результаты по использованию стандартных режимов термообработки для сплава ВТ6, полученного технологией ПЛВ.

## 1. ПОРОШКИ ДЛЯ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Влияние качества исходного материала на структуру и свойства изделий при ПЛВ рассматривается на примере порошков с различными фракциями, изготовленных двумя разными производителями. Обозначения А1, А2 и В1, В2 соответствуют порошкам разной фракции от первого и второго производителей. В табл. 1 и 2 представлены расчетные значения физических параметров порошков и их химический состав, детектируемый на срезе. Продемонстрированы образцы, изготовленные методом прямого лазерного выращивания из рассматриваемых порошков, и влияние свойств порошков на механические свойства изделий.

На рис. 1 представлены SEM-фотографии поверхности каждого образца порошков. На рисунках показаны снимки на двух увеличениях,  $\times 300$  и  $\times 1000$ , в первом случае показаны общая поверхность частиц и дефекты, во втором случае – морфология частиц.

Анализ результатов исследований показал, что присутствие примесей на поверхности порошка оказывает наибольшее влияние на структуру и свойства образца (рис. 1в). В порошке В1 на поверхно-



**Рис. 1.** Порошки, используемые в эксперименте по выращиванию образцов ПЛВ-методом, и диапазон разброса размеров элементов их фракций (РЭМ-изображения): а) А1 (45–100мкм), б) А2 (106–180мкм), в) В1(45–100мкм), г) В2 (160–200мкм)

сти наблюдаются серые включения – предположительно соединения с водородом (табл. 3). При этом обнаружено, что высокое содержание легких элементов может привести к снижению пластичности и увеличению твердости в конечных изделиях. Табл. 4 демонстрирует результаты механических

испытаний образцов, выращенных из порошков ВТ6 с различной фракцией. Порошки были получены от разных производителей. В результате повышенное содержание легких элементов в порошке второго производителя с фракцией 45–100 мкм привело к ухудшению пластических характеристик,

**Таблица 1.** Обзор параметров порошков, используемых в создании образцов, рассматриваемых в данной работе

Порошок	Измеренное распределение, мкм	Коэффициент сферичности, %	Макс. размер, мкм
A1	$d_{10}$ : 53,4; $d_{50}$ : 60,3; $d_{90}$ : 89,9	98,6	105
A2	$d_{10}$ : 106,4; $d_{50}$ : 125,2; $d_{90}$ : 172,5	97,8	184,6
B1	$d_{10}$ : 53,4; $d_{50}$ : 71,1; $d_{90}$ : 88,0	98,7	110
B2	$d_{10}$ : 174,1; $d_{50}$ : 185,2; $d_{90}$ : 195,1	99,3	201,6



**Таблица 2.** Химический состав порошков на срезе

Номер образца	Содержание элементов в масс. %			
	Ti	Al	V	Si
A1	90,02	6,01	3,85	0,12
A2	90,21	6,17	3,48	0,15
B1	89,53	6,05	4,25	0,17
B2	90,03	5,95	3,85	0,18

при этом прочностные характеристики находятся на уровне с другими порошками.

Увеличение размера частиц порошка влечет за собой увеличение размера зерна в структуре выращенных образцов. Наличие сателлитов на поверхности порошка и неравномерное распределение по размерам не влияют на образование дефектов и формирование структуры. В порошке B1 содержание водорода и кислорода оказалось более высоким относительно других порошков, рассматриваемых в эксперименте.

Таким образом, проведенные исследования показывают необходимость проведения полного анализа порошка для аддитивного производства и необходимость высоких требований к его качеству.

## 2. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЗАЩИТНОЙ АТМОСФЕРЫ НА СВОЙСТВА ВЫРАЩИВАЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Исследования взаимосвязи качества защитной атмосферы и качества выращиваемых изделий проводились с помощью контроля концентрации кислорода в защитной камере. Результаты показали, что для титана локальная защита недопустима. Для выращивания изделий из титана требуется использовать высококачественный защитный газ, так как прослеживается сильное влияние наличия примесей в атмосфере на механические характеристики выращенных изделий [6].

Поверхность излома в выращенных образцах из ВТ6 характеризуется вязким разрушением при воздействии одноосного растягивающего напряжения (рис. 2). На поверхности излома образца, полученного в локальной защите (рис. 2а), присутствуют темно-серые пластинчатые включения (предположительно они соответствуют гидриду титана).

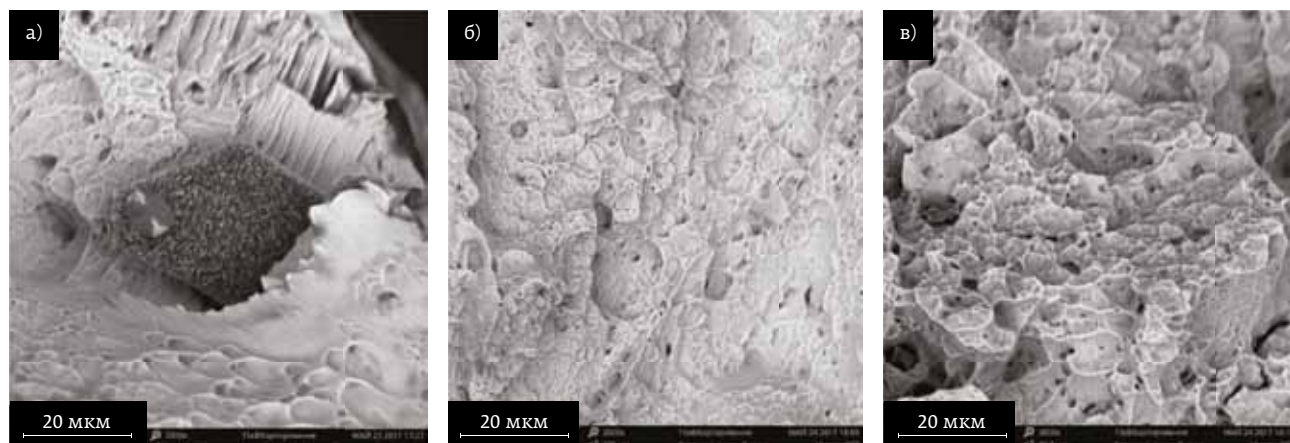
Также в ходе проведения экспериментов было установлено, что для проведения процесса ПЛВ необходимо использование криоцилиндров со сжиженным аргонем, потому что такая система обеспечивает высокую чистоту используемого газа и позволяет исключить попадание различных нежелательных примесных газов и водяных паров.

**Таблица 3.** Результаты определения содержания легких элементов методом восстановительного плавления

Номер образца	Размер фракции порошка, мкм	Среднее содержание элементов, масс.%					
		Порошок			Выращенные образцы		
		O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
A1	45–100	0,10	0,014	0,0012	0,25	0,010	0,0025
A2	106–180	0,11	0,0072	0,0012	0,20	0,010	0,0025
B1	45–100	0,136	0,014	0,041	0,25	0,013	0,024
B2	160–200	0,115	0,011	0,0032	0,14	0,005	0,006

**Таблица 4.** Результаты механических испытаний образцов, полученных из различных порошков ВТ6 после выращивания

Образец	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Микротвердость образца, HV <sub>0,5</sub>	Микротвердость порошка, HV <sub>0,05</sub>
A1	1130	920	8,2	375	358
A2	1100	970	8,1	376	355
B1	1120	1030	6,3	408	358
B2	1120	1014,3	9	355	344



**Рис. 2.** Фрактограммы изломов образцов при обеспечении: а) локальная защита; б) защитный газ с 1%-примесью легких химических элементов; в) защитный газ с 0,02%-примесью

### 3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА АНИЗОТРОПИЮ СТРУКТУРЫ

Анизотропия структуры в процессе выращивания исследована на тонких пластинах размером  $110 \times 30 \times 2$  мм в зависимости от погонной энергии, рассчитанной в соответствии с [7] (табл. 6).

Повышение скорости и мощности могут существенно изменять структуру, а также приводить к формированию дефектов. Кроме того, повышается уровень остаточных напряжений. На рис. 3 представлены фотографии микроструктуры образцов в трех направлениях. Из рисунка

видно, что образец с высокой погонной энергией относительно других режимов характеризуется более равномерной структурой во всех направлениях. Для всех трех режимов характерна направленная кристаллизация в сторону роста изделия. Образцы А2 и А3 отличаются незначительно по величине объемной энергии, и для них характерен значительный рост зерна в поперечном сечении. Зерна произрастают через слои и достигают размеров в направлении отвода тепла порядка 10 слоев (приблизительно 8 мм).

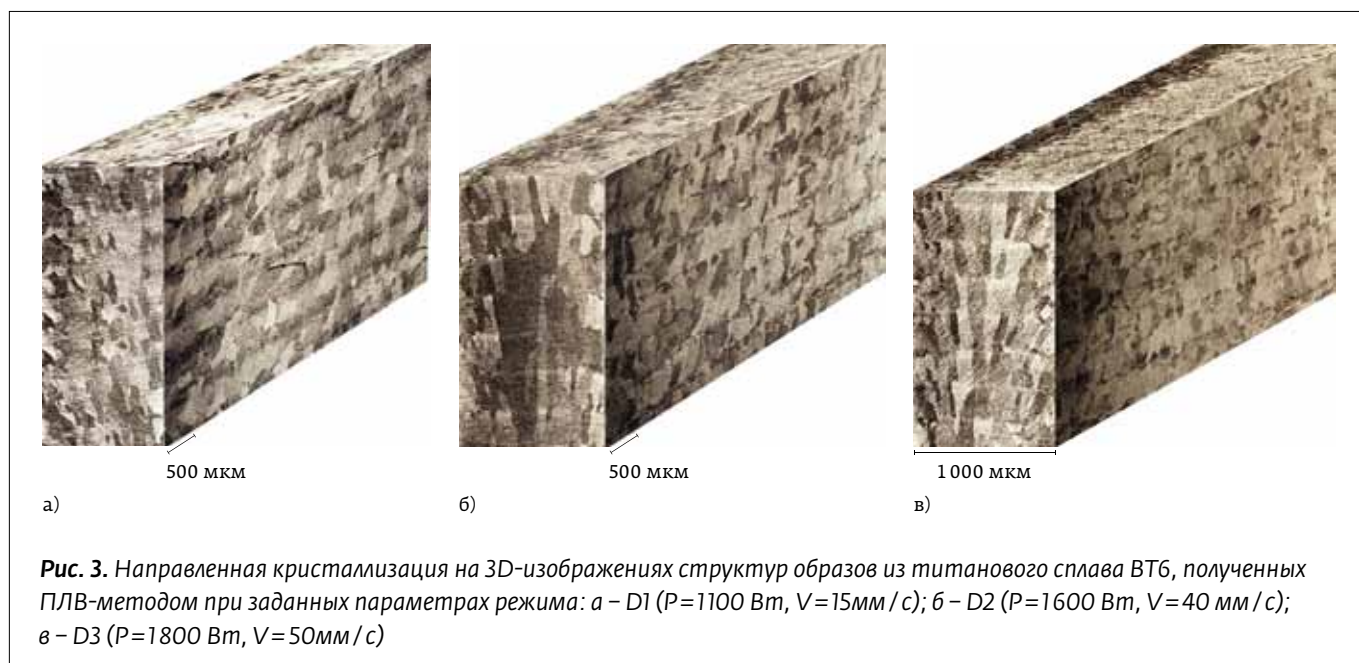
Как видно из таблицы, с уменьшением объемной энергии происходит значительное падение

**Таблица 5.** Усредненные результаты механических испытаний

№ образца	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Микротвердость, $HV_{0,5}$	Содержание кислорода в камере, %
1	983,4	934,4	1,6	400	Локальная защита
2	929,0	872,7	3,3	380	1,0
3	1120	1014,3	9	355	0,02

**Таблица 6.** Режимы изготовления образцов методом прямого лазерного выращивания

№	Мощность излучения, Вт	Скорость процесса, мм/с	Диаметр пятна, мм	Высота слоя dz, мм	Погонная энергия $E_p^*$ , Дж/мм <sup>2</sup> [4]
D1	1100	15	2,6	0,6	47,00
D2	1600	40	2,6	0,6	25,64
D3	1800	50	2,6	0,6	23,08



пластических характеристик, кроме того наблюдается увеличение твердости. Так как образцы А2 и А3 незначительно различаются по погонной энергии, то и механические свойства различаются незначительно (табл. 9). Отметим, что микротвердость образца D1 ниже микротвердости D2 и D3.

Значительное увеличение мощности и скорости процесса приводит к снижению механических характеристик. Таким образом, в случае важности повышения производительности необходимо предусматривать дополнительную термическую обработку для уменьшения анизотропии структуры.

#### 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКАНИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ В ПРОЦЕССЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ

Разработан и исследован способ снижения анизотропии и уменьшения количества метастабильных фаз в структуре. Для этого была использована лазерная сварочная голова FLW D30W Wobble +seam

tracking module производства IPC, которая обеспечивала прохождение луча по Z-образной траектории, т. е. с осцилляцией (как правило, при прямом лазерном выращивании лазерный луч сканирует поверхность по прямой траектории) [8, 9].

В эксперименте были исследованы две группы образцов, выращенных из порошка титанового сплава ВТ6. Первая партия была выращена в режиме выращивания без осцилляции лазерного излучения, а вторая – в режиме с использованием сканирования лазерного пучка по заданной траектории (рис. 4).

Формирование зерен в структуре образца E1 неравномерное (рис. 4а): по краям стенки зерна равноосные, в то время как в середине образца зерна вытянуты в направлении наложения слоев. Средняя ширина зерен в слое от 40 до 230 мкм, а между слоем от 45 до 180 мкм.

Формирование зерен в структуре образца E2 более равномерное: равноосные зерна располагаются по всей поверхности образца, в середине наблюдаются более вытянутые зерна, средняя ширина

**Таблица 7.** Результаты механических испытаний на одноосное растяжение

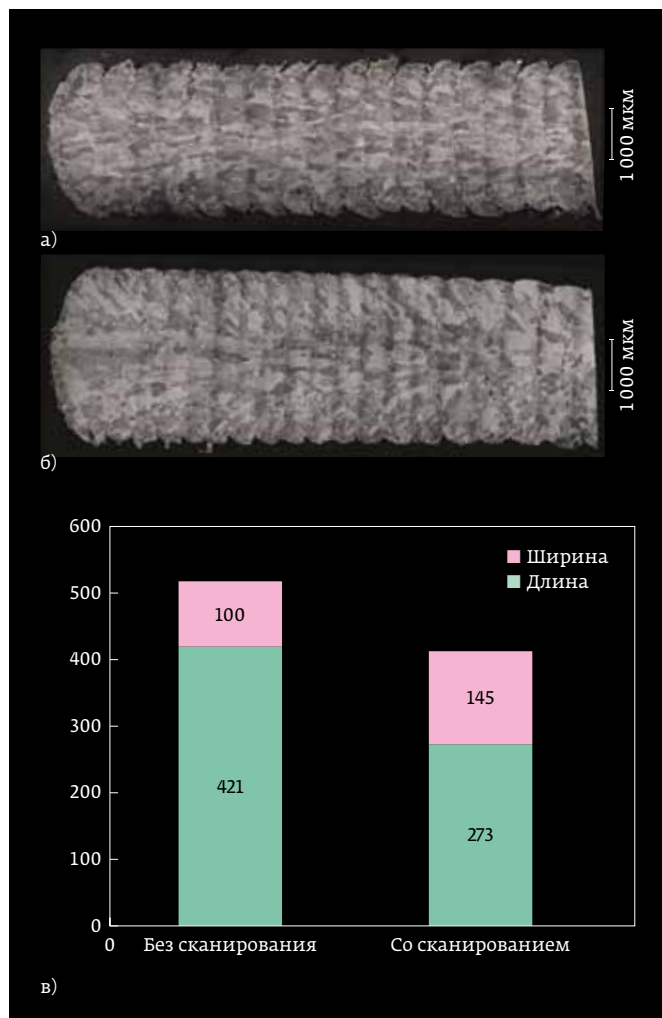
Состояние	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Микротвердость, HV <sub>0,3</sub>
ПЛВ	1 309	1,6	435
ПЛВ с осцилляцией	1 135	10,0	380
ГОСТ 22178-76	885	8,0	293–361

зерен в слоях от 75 до 175 мкм, а на границах слоев от 65 до 160 мкм.

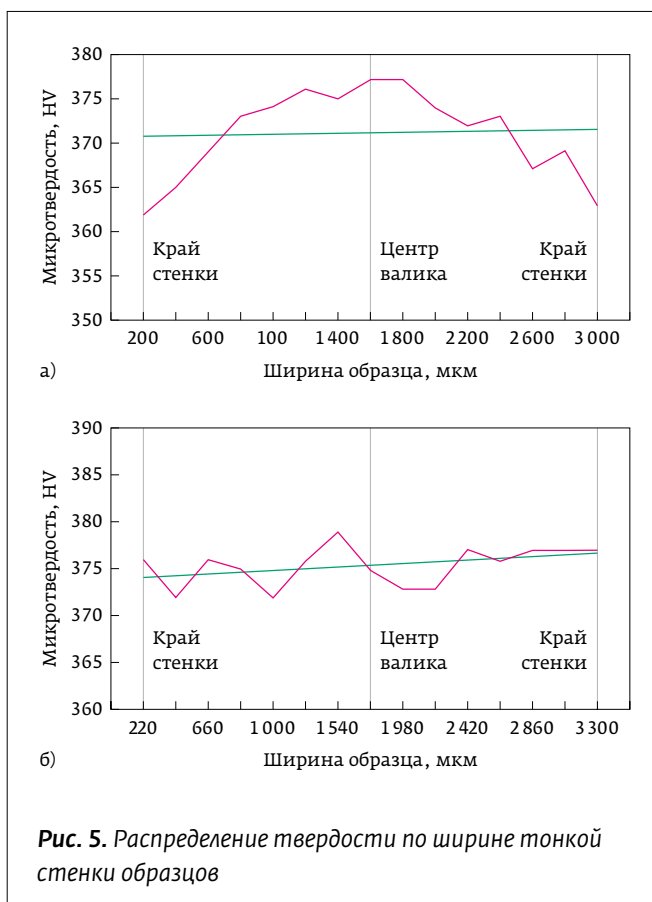
На рис. 4в представлены результаты измерения высоты зерен по всей поверхности образца. Соотношение длины/ширины у образца E2 меньше, чем у образца E1: 421/100 и 273/145, соответственно.

Для образцов E1 и E2 характерно наличие мелких (порядка 50 мкм) равноосных зерен в зоне перекрытия двух слоев: быстрый переход от равноосных зерен к вытянутым обуславливается увеличением скорости охлаждения.

Результаты измерения микротвердости показали, что в образце E1 твердость не равномерна по ширине: в центре образца твердость выше, чем по краям (см. рис. 5а). Это может быть связано с гауссовским распределением луча – по краям стенки



**Рис. 4.** Анализ макроструктуры образцов, полученных ПЛВ-методом при режимах: а) без осцилляции (E1) и б) с осцилляцией лазерного луча (E2); в) сравнение длины и ширины зерен для образца E1 и E2

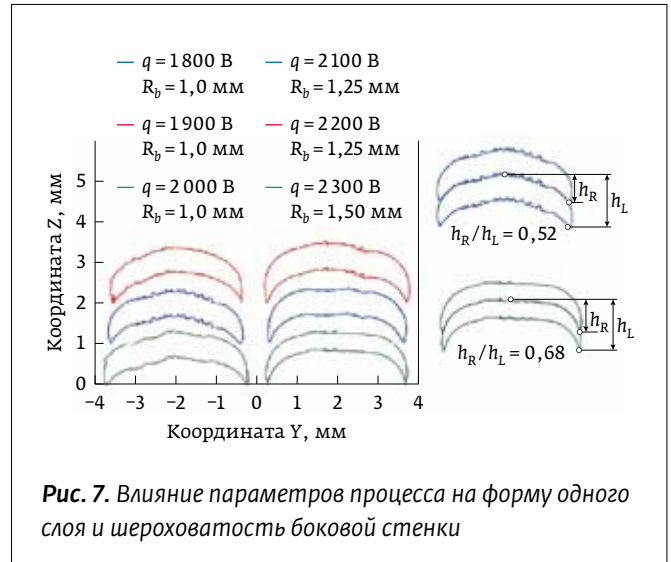
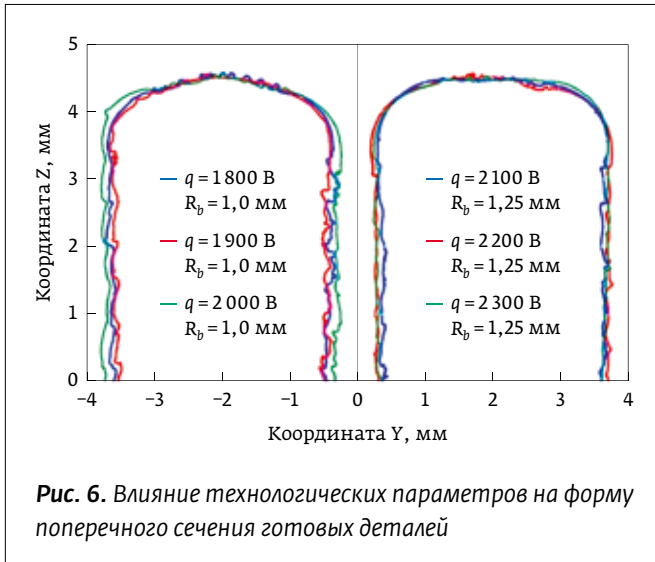


**Рис. 5.** Распределение твердости по ширине тонкой стенки образцов

плотность мощности меньше, что приводит к образованию подрезов, а также нестабильному формированию микроструктуры и различной ориентации пластин внутри зерен (рис. 5).

Другое существенное отличие образцов – это величина шероховатости. В образце E1 шероховатость выше ( $Ra_1 = 165$  мкм) по сравнению с образцом E2 ( $Ra_2 = 7,72$  мкм). Как известно, высокая шероховатость является технологическим концентратором напряжений, снижает прочностные характеристики металла независимо от вида напряженного состояния, кроме того механическая обработка для удаления шероховатости на образце E1 приведет к уменьшению его толщины, а следовательно, и увеличению количества отходов. Толщина образца E1 – 2,7 мм, а образца E2 – 3,6 мм, следовательно, сканирование лазерного излучения позволяет получать изделия более 3 мм толщиной.

Тепловой поток, нормально распределенный по сечению лазерного пучка, в режиме, не использующем колебания лазерного луча, определяется пиковым значением теплового потока и радиусом лазерного луча. В случае лазерного выращивания образцов в режиме, использующем осцилляцию лазерного луча, распределение теплового потока



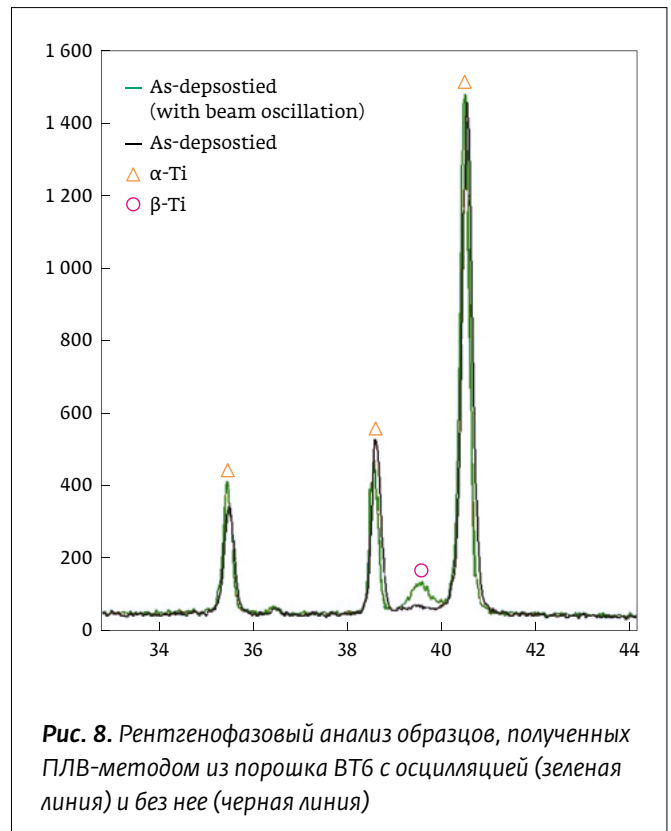
зависит не только от ранее обсужденных параметров, но также и от дополнительного параметра, относящегося к амплитуде колебаний. В эксперименте было продемонстрировано, что увеличение радиуса пучка до значений, превышающих величину амплитуды колебаний луча, приводит к быстрому снижению плотности мощности.

Увеличение мощности лазера с постоянным радиусом луча ( $R_b=1$  мм) приводит к уменьшению шероховатости поверхности деталей и увеличению ширины стенки (рис. 6, слева). Совместное увеличение мощности лазера и радиуса луча оказывает большее влияние на толщину стенки (рис. 6, справа). Следует отметить, что высота нанесенного слоя ( $h_L$ ) для всех этих случаев одинакова (рис. 7). Размер шероховатости зависит от глубины переплавления ранее нанесенного слоя. Осцилляции пучка позволяют увеличить ширину расплавленной ванны и, следовательно, уменьшить шероховатость за счет увеличения  $h_R$  (чем выше отношение  $h_R/h_L$ , тем ниже шероховатость боковой стенки).

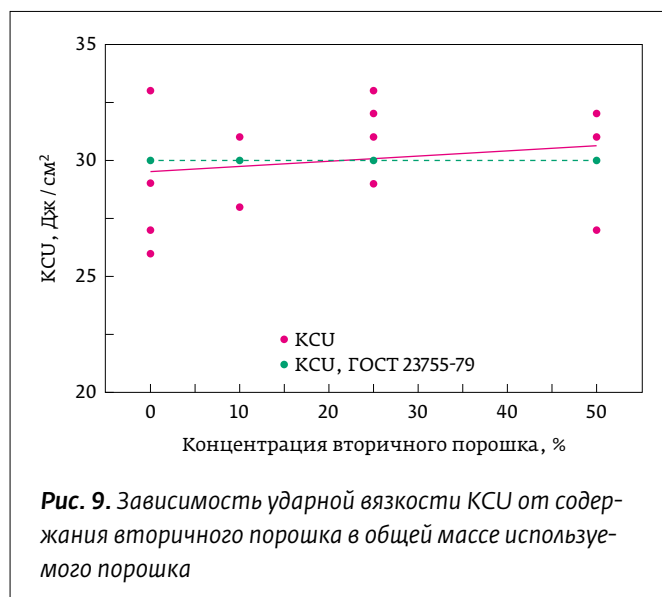
Таким образом, использование осцилляции луча позволяет снизить анизотропию, шероховатость поверхности и повысить эффективную толщину тонкой стенки. Помимо этого распределение энергии в сечении лазерного пучка за счет колебаний позволяет уменьшить количество метастабильной  $\alpha'$  фазы и повысить количество  $\beta$ -фазы, что подтверждает рентгенофазовый анализ (рис. 8).

Основной фазовый состав образцов представлен мартенситными фазами  $\alpha'$  (по схеме расщепления  $\alpha$ -Ti) с кристаллической решеткой P63/mmc (HCP) с параметрами  $a=2,9505$  Å,  $c=4,6826$  Å, не

отличающимся от образца к образцу в пределах погрешности измерения для обзорных стенок, а также  $\beta$ -Ti с кристаллической решеткой Im3m (BCC) с параметром  $a=3,3065$  Å. Следует отметить, что использование при осцилляции по рабочей поверхности лазерного пучка с равномерным распределением плотности мощности излучения по сечению приводит к стабилизации  $\beta$ -Ti в диапазоне 5-7%.







**Рис. 9.** Зависимость ударной вязкости KCU от содержания вторичного порошка в общей массе используемого порошка

Вместе с тем значения механических параметров образцов, полученных без осцилляции лучом, оказались ниже, чем у образцов, изготовленных с осцилляцией лазерного луча (табл. 9). В эксперименте испытанию подвергали плоские образцы, созданные методом прямого лазерного выращивания в режимах с осцилляцией луча и без нее (предварительная обработка поверхности для снятия шероховатости не проводилась).

Использование режима с осцилляцией лазерного излучения позволяет получать образцы титанового сплава ВТ6 с фазовым составом  $\alpha + \beta$ , при этом содержание  $\beta$ -фазы достигает 6% в исходном состоянии без термической обработки. Такое содержание  $\beta$ -фазы позволяет достичь в образцах значений величины пластичности до 10% и значений величины прочности на растяжение – до 1135 МПа, что превышает величины, установленные ГОСТом для изделий в состоянии после литья.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ПОРОШКА

В ходе ПЛВ-процесса часть порошка не попадает в зону плавления, и это значительно сокращает коэффициент использования материала (КИМ). Для повышения КИМ можно реализовать повторное использование порошка. Договоримся, что будем называть вторичным порошок, однократно используемый в процессе ПЛВ и просеянный через сито с ячейкой 100 мкм, а еще не используемый порошок – первичным. Для того, чтобы определить влияние вторичного порошка на качество титановых изделий, исследованы выращенные образцы, изготовленные из смесей с различным соотношением первичного и вторичного порошков (первичный/вторичный): 100/0, 90/10, 75/25, 50/50. Выращивание подобного вида образцов предполагает одновременное использование двух колб порошкового питателя. Предварительно в программе задается необходимый в процентном содержании расход порошка на каждую из колб.

Механические испытания проводились на образцах после этапа отжига, который заключается в нагреве образца до температуры 800 °С в вакууме, выдержке в течение 1 часа при этой температуре и последующем медленном охлаждении в печи до комнатной температуры. В табл. 8 представлены результаты испытаний на одноосное растяжение и ударную вязкость образцов, изготовленных ПЛВ-методом из различных смесей (первичный/вторичный) порошков. Испытания проводились вдоль направления наложения слоев и поперек этого направления.

Были проведены испытания на ударную вязкость образцов с U-образным надрезом KCU и испытания на одноосное растяжение. Механические свойства образцов соответствуют данным из ГОСТ для отожженной плиты.

**Таблица 8.** Результаты механических испытаний для образцов с различным содержанием вторичного порошка.

	Кол-во II порошка, %	Предел текучести $\sigma_{0,2}^*$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B^*$ , МПа	Относительное удлинение $\delta^*$ , %	KCU*, Дж/см <sup>2</sup>
F1	0	970	1076	8,2	28
F2	10	960	1080	8,0	30
F3	25	965	1085	8,3	30
F4	50	960	1080	8,5	30
Плита отожжен. ГОСТ 23755-79			835–1080	6–8	30

0+

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ «АРМИЯ-2020»**

**23–29 АВГУСТА  
ПАТРИОТ ЭКСПО**

[WWW.RUSARMYEXPO.RU](http://WWW.RUSARMYEXPO.RU)

**Таблица 9.** Механические характеристики образцов из титанового сплава ВТ6, полученных методом прямого лазерного выращивания на различных режимах

Режим	Еп, Дж/мм <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Микротвердость, HV <sub>0,01</sub>
A1	47,00	1132,3	907,9	8,2	364
A2	25,64	1155,7	1010,9	5,4	380
A3	23,08	1166,7	905,3	5,1	380
Литье ГОСТ 22178-76		885	804	8	250–300

Ударная вязкость образца представлена линейной зависимостью в продольном направлении с незначительным ростом значений. Образец разрушился по схеме вязкого разрушения с участками хрупкого. Структура излома характеризуется вязким изломом с межзеренным разрушением.

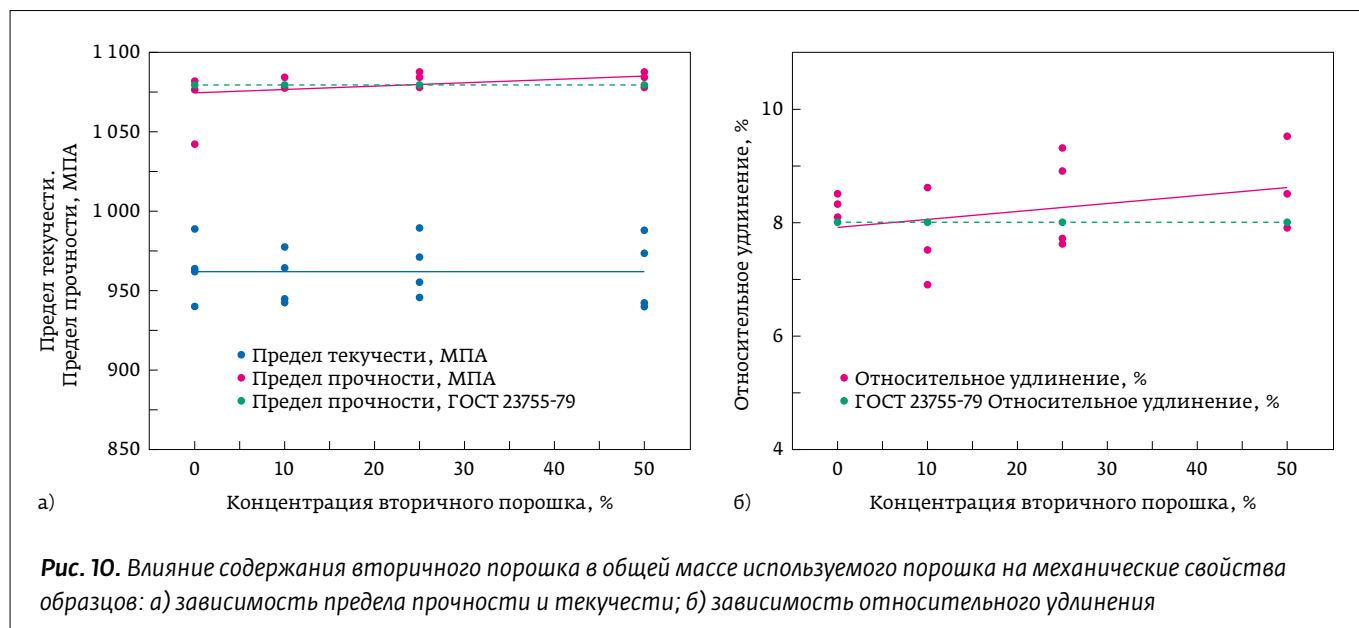
При увеличении содержания вторичного порошка в образцах без термообработки твердость увеличивается. После термической обработки твердость распределена равномерно вследствие рекристаллизации титанового сплава и уменьшения величины зерен. Исходная структура из крупных зерен ( $\alpha+\alpha'$ )-фазы при нагреве, а затем при медленном охлаждении превращается в структуру из мелких зерен ( $\alpha+\beta$ )-фазы. Таким образом, в результате термической обработки, а именно – рекристаллизационного отжига с последующим медленным охлаждением, уходит неравновесная мартенситная структура, и наблюдается равновесная ( $\alpha+\beta$ )-структура. Отмечено, что в процессе

термообработки снижается твердость и прочность сплава, а пластичность повышается.

Заключение по результатам исследования позволило утверждать, что при использовании смеси первичного и вторичного порошка до соотношения 50/50 присутствует стабильное формирование стенки. При этом последующая термообработка изделий, направленная на получение равновесной двухфазной ( $\alpha+\beta$ )-структуры и уменьшению размеров зерна, дает возможность получить в образце равномерную структуру, изменения фазового состава, а также механические характеристики на уровне значений, стандартизованых документом ГОСТ 23755-79 для отожженной плиты.

## ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований установлены правила, соблюдение которых в технологии прямого лазерного выращивания из тита-



**Рис. 10.** Влияние содержания вторичного порошка в общей массе используемого порошка на механические свойства образцов: а) зависимость предела прочности и текучести; б) зависимость относительного удлинения



новых сплавов позволяет получить качественные изделия:

- Можно использовать порошки с элементами размером вплоть до 180 мкм, но порошки с широким диапазоном фракций надо исключить. При этом порошки не должны иметь неметаллических включений, количество сателлитов стоит минимизировать.
- К защитной атмосфере при выращивании изделий из титана следует предъявлять высокие требования, так как даже небольшое количество примесей легких элементов приводит к существенному ухудшению пластичности.
- Подбор режимов прямого лазерного выращивания необходимо производить так, чтобы уменьшить анизотропию структуры, которая может привести к падению пластичности.
- Большая шероховатость при выращивании изделий из титана может привести к хрупкому разрушению непосредственно в процессе охлаждения изделий после выращивания. Поэтому требуется контролировать ее размер и придерживаться минимально допустимого уровня.
- Термическая обработка выращенных изделий из титана рекомендована как для возможности использования порошков вторичного использования в процессе ПЛВ, так и для минимизации влияния анизотропии.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в ходе реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Соглашение с Минобрнауки России № 075-11-2018-067 от «28» апреля 2017 года (внут. № 03.С25.31.0240)).

## ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА В РАБОТУ

Идея проведения эксперимента и организация эксперимента: О. Г. Климова-Корсмик, М. О. Гущина; проведение эксперимента: А. М. Вильданов, С. А. Шальнова; обработка результатов: Е. К. Валдайцева, О. Г. Климова-Корсмик, М. О. Гущина. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туричин Г. А., Земляков Е. В., Климова О. Г., Бабкин К. Д., Шамрай Ф. А., Колодяжный Д. Ю. Прямое лазерное выращивание – перспективная аддитивная технология для авиадвигателестроения. *Сварка и Диагностика*. 2015; 3: 54–57.
2. Turichin G. A., Zemlyakov E. V., Klimova O. G., Babkin K. D., Shamraj F. A., Kolodyazhnyy D. YU. Pryamoe lazernoe vyrashchivanie – perspektivnaya additivnaya tekhnologiya dlya aviadvigatelistroeniya. *Svarka i Diagnostika*. 2015; 3: 54–57.
3. Debroy T., Wei H. L., Zuback J. S., Mukherjee T., Elmer J. W., Milewski J. O., Allison Michelle Beese, A. Wilson-Heid, A. De, W. Zhang. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018; (92): 112–224.
4. Liu S., Shin Y. C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*. 2019; 164: 107552.
5. A. I. Azarniya, X. G. Colera, M. J. Mirzaali, S. Sovizi, F. Bartolomeu, M. St. Weglowski, W. W. Wits, C. Y. Yap, J. Ahn, G. Miranda, F. S. Silva, H. R. Hosseini, S. Ramakrishna, A. A., Zadpoor. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019, (804): 163–191.
6. Y. Liu, Y. Q. Yang, D. Wang. Study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder *International Journal Advanced Manufacturing Technology* 2016, (87): 647–656
7. M. O. Sklyar, O. G. Klimova-Korsmik, V. V. Cheverikin. Formation structure and properties of parts from titanium alloys produced by direct laser deposition. *Solid State Phenomena*. 2017, (265): 535–541.
8. V. Matilainen, H. Piili, A. Salminen, T. Syvänen, O. Nyrhilä Characterization of Process Efficiency Improvement in Laser Additive Manufacturing. *Physics Procedia*, 2014, (56): 317–326
9. S. A. Shalnova, O. G. Klimova-Korsmik, M. O. Sklyar. Influence of the roughness on the mechanical properties of ti-6al-4v products prepared by direct laser deposition technology. *Solid State Phenomena*. (2018, (284): 312–318.
9. G. Turichin, E. Zemlyakov, K. Babkin, S. Ivanov, A. Vildanov. Laser metal deposition of Ti-6Al-4V alloy with beam oscillation. *Procedia CIRP*. 2018 (74): 184–187.

## Листая страницы документов

Прошло три года с момента принятия Указа Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 года № 642, которым была утверждена Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации. В документе указано, что на первом этапе реализации Стратегии (2017–2019 годы):

а) создаются организационные, финансовые и законодательные механизмы, обеспечивающие гармонизацию научной, научно-технической, инновационной, промышленной, экономической и социальной политики и готовность Российской Федерации к большим вызовам;

б) осуществляется запуск научных проектов, которые направлены на получение новых фундаментальных знаний, необходимых для долгосрочного развития, и основаны в том числе на конвергенции различных направлений исследований, включая гуманитарные и социальные;

в) начинается реализация научно-технических проектов в рамках приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, определенных в настоящей Стратегии;

г) формируется целостная система устойчивого воспроизводства и привлечения кадров

для научно-технологического развития страны;

д) создаются условия, необходимые для роста инвестиционной привлекательности научной, научно-технической и инновационной деятельности.

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 августа 2019 года № 1824-р установлены 11 показателей реализации Стратегии, динамика которых подлежит мониторингу. Показатели сгруппированы по направлениям.

## Выставка аддитивных технологий в промышленности 3D fab + print Russia на interplastica 2020

Международный специализированный проект и конференция по аддитивным технологиям в промышленности «3D fab + print» пройдут с 28 по 31 января 2020 года в ЦВК «Экспоцентр» на Красной Пресне параллельно с выставками interplastica и urakovka 2020. Это событие уже четвертое по счету. О своем участии заявили ведущие российские и зарубежные эксперты, российские интеграторы и пользователи аддитивных технологий, средств лазерного сканирования и контроля, производители материалов.

Обсуждения и решения, которые будут предложены в ходе мероприятий, позволят исключить риск малоэффективных инвестиций в техническое перевооружение предприятий, а также дать ответы на многие вопросы, возникающие при выборе и внедрении в промышленную эксплуатацию инновационных (в том числе аддитивных) технологий. На конференции будут рассмотрены следующие волнующие темы:

1. Зачем и как нужно внедрять АТ на предприятии
2. Выбор целевого сегмента рынка
3. Грамотный подбор технологии и оборудования
4. Как организовать успешный бизнес с использованием АТ
5. Санкции – вызов или окно возможностей
6. Государственная поддержка высокотехнологичных средств производства



7. Нюансы, подводные камни, советы по работе с АТ и многое другое.

Традиционно главный акцент сделан на активно используемые и инновационные технологии, средства сканирования, контроля, расходные материалы и периферийное оборудование для промышленного применения.

<https://3dfabprint.ru/>; <http://interplastica.ru/>

## LASYS 2020

Международная выставка LASYS, посвященная лазерной обработке материалов, пройдет с 16 по 18 июня 2020 года в выставочных залах Штутгарта. В этот раз организаторы выставки хотят сделать акцент на лазерных маркировочных системах.

Для различных целевых групп пользователей маркировка компонентов лазерами теперь стала незаменимой. К этим целевым группам относятся автомобильный сектор, машиностроение, электротехническая и электронная промышленность, оптическая промышленность, машиностроение и приборостроение, металлообработка, медицинские технологии, индустрия пластмасс и упаковки, инструментальное и литейное производство, полупроводниковая промышленность.

Прослеживаемость компонентов и индивидуализация продукции способ-

ствуют росту рынка лазерных маркировочных систем. Растет тенденция персонализации многих массовых продуктов (например смартфонов и их защитных чехлов). В настоящее время практически не имеет значения материал, из которого изготавливаются изделия: из пластмасс, металла, стекла, керамики или органических материалов, кожи или дерева. Лазерные маркеры универсальны и могут использоваться в широком диапазоне материалов.

Для лазерной маркировки открываются новые рынки. Сельское хозяйство само по себе является прибыльным целевым рынком. А недавно было объявлено об использовании лазерной маркировки для ушных бирок животных как более удобных с точки зрения простоты и безвредного воздействия на здоровье. Другой рынок – рынок мощных светодиодов, производство которых должно быть

полностью прослеживаемым. Лазерные маркеры вписывают крошечные 2D-матричные коды, которые состоят из точек диаметром всего 43 микрометра, в свинцовые рамки оправ светодиодов. Особенно строгие требования предъявляются к идентификации продукции в секторе медицинских технологий. Прослеживаемость, долгосрочная стабильность и коррозионная стойкость являются ключевыми факторами, которые необходимо учитывать при маркировке медицинских инструментов.

Но не все задачи еще решены. Маркировка волокнистых композитов по-прежнему остается сложной задачей из-за неоднородной структуры материала. Эти вопросы будут обсуждаться на конференции, которая пройдет в дни работы выставки в Штутгартском университете.

[www.lasys-messe.de](http://www.lasys-messe.de)

25–29 | 05 | 2020

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»  
[www.metobr-expo.ru](http://www.metobr-expo.ru)



# 2020

21-я международная  
специализированная  
выставка

# МЕТАЛЛООБРАБОТКА

Реклама 12+



 МИНПРОМТОР  
РОССИИ



«Оборудование,  
приборы и инструменты  
для металлообрабатывающей  
промышленности»

При поддержке:

- Совета Федерации Федерального Собрания РФ
- Министерства промышленности и торговли РФ
- Союза машиностроителей России

Под патронатом ТПП РФ

Организаторы:

