

УДК 620.179.5

## ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ФРЕЗЕРОВАНИЕМ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Балякин А.В., Деменок В.А., Курбатов В.П.

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), Самара, e-mail: balaykinav@ssau.ru

Детали и узлы современных газотурбинных двигателей и установок становятся всё сложнее и совершеннее, используемые в них материалы характеризуются прочностью, высокотемпературной стойкостью и повышенными требованиями к износостойкости. Использование новых материалов требует, среди прочего, разработки соответствующих технологий производства, т.к. оборудование и инструмент становятся дороже, требования к срокам и качеству изготовления все выше, коэффициент использования материала стремится к единице. Аддитивные технологии становятся основной альтернативой производства компонентов ГТД, переходящей к цифровой технологии производства, создающей сквозной цикл проектирования и производства. Наибольшее развитие на сегодняшний день получили методы селективного лазерного сплавления и технологии прямого лазерного спекания порошковых металлических композиций, увязывающих операции в единый производственный параллельный процесс. Авторы показывают влияние механической обработки фрезерованием на поверхностный слой образца из титанового сплава VT20, полученного методом прямого лазерного выращивания. В статье описывается проведение эксперимента, используя механическую обработку, и полученные результаты. Микроструктура полученных образцов представляет собой мелкозернистую структуру с мартенситными образованиями, проанализированы результаты измерений составляющих сил резания, микротвёрдости до и после механической обработки, наименьшая шероховатость поверхности обработанного образца наблюдается при  $t = 0,3$  мм,  $V = 80$  м/мин и  $F = 0,05$  мм/зуб.

**Ключевые слова:** титановый сплав, прямое лазерное выращивание, микроструктура, шероховатость поверхности, микротвёрдость, фрезерование

## EFFECT OF PROCESSING BY MILLING ON THE SURFACE LAYER OF TITANIUM VT20 ALLOYS, OBTAINED BY METHOD OF DIRECT LASER DEPOSITION

Balyakin A.V., Demenok V.A., Kurbatov V.P.

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, e-mail: balaykinav@ssau.ru

Details and components of modern gas turbine engines and plants are becoming more complex and sophisticated, the materials used in them are characterized by strength, high temperature resistance and increased requirements for wear resistance. The use of new materials requires, among other things, the development of appropriate manufacturing technologies. equipment and tools become more expensive, the requirements for terms and quality of manufacturing are all higher, the utilization factor of the material tends to one. Additive technologies are becoming the main alternative to the production of GTE components, shifting to digital production technology creating an end-to-end cycle of design and production. The greatest development to date has been the methods of selective laser melting and the technology of direct laser deposition of powdered metal compositions linking operations into a single production parallel process. The authors show the influence of machining by milling on a surface layer of a sample of a titanium alloy VT20, obtained by direct laser deposition. The article describes the experiment and the results obtained using mechanical processing. The microstructure of the samples obtained is a fine-grained structure with martensite formations, Analyzed of measurements of the components of cutting forces, microhardness before and after machining, the least roughness of the surface of the treated specimen is observed at  $t = 0,3$  mm,  $V = 80$  m/min and  $F = 0,05$  mm/tooth.

**Keywords:** titanium alloy, direct laser deposition, microstructure, surface roughness, microhardness, milling

Аддитивные технологии производства предлагают новые возможности для разработки и проектирования изделий и позволяют изготавливать изделия сложной формы, с пустотами, поднутрениями и т.д. Формирование трехмерного изделия происходит путем последовательного сплавления слоев материала (металлический порошок или проволока) лучом лазера по заданной программе в соответствии с трехмерной моделью. Лазерное выращивание применяется в целях создания деталей с градиентными свойствами включающих в себя бионический дизайн или латисные

структуры, а также изделий с дополнительным набором свойств, например износостойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и т.д. Технологии аддитивного производства позволяют как создавать новые, так и восстанавливать поврежденные или изношенные детали. Шероховатость поверхности при селективном лазерном сплавлении составляет по Ra от 1,7 до 3,2 мкм, при гетерофазной технологии прямого лазерного выращивания по Ra от 3,7 до 6,0 мкм это означает, что постобработка всегда будет востребована, для достижения желаемого качества поверхно-

сти и геометрии конечной детали [1]. Следовательно, сочетание лазерного выращивания и механической обработки является частью данного исследования.

Использование технологии прямого лазерного выращивания, при котором осуществляется контролируемое спекание частиц порошка в поле лазерного излучения, обеспечивается совмещением газопорошковой струи с лазерным лучом, является прогрессивным направлением для создания деталей авиационных двигателей [2]. После кристаллизации у материала будет особая структура с мелким зерном, которая обеспечивает высокий уровень механических свойств. Преимущество прямого гетерофазного лазерного выращивания в том, что этот метод позволяет увеличить производительность и соответственно сократить сроки изготовления деталей. Из преимуществ также можно отметить отсутствие деформации в процессе выращивания и минимизацию термического влияния. Особенно выгодно применение данной технологии в случае сложных изделий, когда требуется многоэтапное проектирование и конструирование, создание демонстрационных образцов в короткие сроки, внесение корректировок и изменений в проект, изготовление прессформ, штампов и оснастки для серийного производства [3]. Установки прямого лазерного выращивания (DLD) не ограничены размерами рабочей камеры, в ходе процесса обеспечивается подача газовой струей порошка непосредственно в зону выращивания. Технология активно совершенствуется, и одна из ее разновидностей – гетерофазная технология прямого лазерного спекания – отличается условиями спекания, при которых частицы сплава не полностью плавятся и одновременно сплавляются с предыдущим слоем.

Характерные особенности технологии прямого гетерофазного лазерного выращивания:

- высокий коэффициент использования металлического порошка ( $\approx 95\%$ );
- ограничение по размерам изделия (минимальной толщины стенки, нависающими конструкциями и т.д.) определяется возможностью фокусировки лазерного луча;
- в процессе изготовления изделия можно изменить материал порошка (титан, алюминий, нержавеющая сталь, медные сплавы и др.), формируя при этом градиентные свойства;
- производительность процесса составляет 3–5 кг/час;
- габариты изготавливаемого изделия ограничиваются только размерами рабочей камеры построения и достигают в диаметре до 2–3 м [4, 5].

Отклонение в плотности получаемого материала менее 0,5%, это обеспечивается за счет поддержания в зоне плавления порошка двухфазного состояния материала (твердого и жидкого), что соответствует свойствам проката. Многочисленные исследования проведены для деталей из титановых сплавов полученных традиционным способом (штамповка, литьё, прокат) [6–8], в то время как исследований для деталей, изготовленных методами прямого гетерофазного лазерного выращивания, недостаточно.

Титановые сплавы являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в настоящее время в разных отраслях промышленности. Широкое их использование связано со свойствами присутствующими титановым сплавам – высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, немагнитность, малая плотность, хорошая жаропрочность при температурах эксплуатации от 250 до 600 °С.

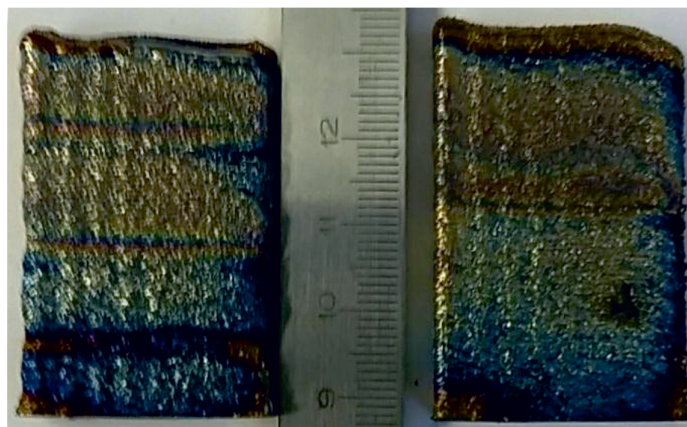


Рис. 1. Образцы полученные методом гетерофазного прямого лазерного выращивания

В работе исследовали влияние обработки фрезерованием заготовки, полученной с помощью технологии прямого лазерного выращивания, в соответствии с планом проведения эксперимента по определению усилия фрезерования  $F_{\{V,S,t\}}$ , заданный на множестве технологических параметров  $\{V\{V_{\min}, V_{mid}, V_{\max}\}, \{S_{\min}, S_{mid}, S_{\max}\}, \{t_{\min}, t_{mid}, t_{\max}\}\}$ . В статье приводятся результаты исследования микроструктуры, микротвёрдости и шероховатости поверхности образцов, полученных методом прямого лазерного выращивания (рис. 1).

### Материалы и методы исследования

Экспериментальное выращивание образцов производилось на лабораторном стенде, на базе волоконного лазера ЛС-5 мощностью 5 кВт производства ИРЭ-Полнос. Излучение фокусировали с помощью технологической лазерной головки Highyag Vimo. Подача материала осуществлялась порошковым питателем Twin 10. Для формирования газопорошковой струи использовали не коаксиальное сопло с диаметром выходного отверстия 2 мм, разработанное коллективом ИЛИСТ [2, 3]. Фракционный состав порошка – 53–150 мкм, форма частиц – сферическая, химический состав приведён в табл. 1.

Сплав VT20 относится к псевдо- $\alpha$ -сплавам, содержит большое количество алюминия и малые концентрации  $\beta$ -стабилизаторов. Псевдо- $\alpha$ -сплавы термически не упрочняются, их применяют в отожжённом состоянии. К недостаткам псевдо- $\alpha$ -сплавов можно отнести сравнительно невысокую прочность и большую склонность к водородной хрупкости. Диапазоны технологических параметров выращивания образцов из титанового сплава VT20 приведены в табл. 2.

Траектория выращивания образцов – в начале два оборота по наружному периметру прямоугольника со сторонами 28 мм и 8 мм, потом по спирали к центру с шагом спирали 0,7 мм. Образцы были построены в защитной атмосфере аргона, с содержанием кислорода не более 400 ppm. Геометрия всех образцов

представляет собой параллелепипед с размерами (ВхДхШ) 42х28х8 мм. Образцы были выращены с вертикальной ориентацией (рис. 1). На поверхности образцов наблюдается окисленная пленка, это говорит о недостаточном качестве инертной атмосферы в камере построения стенда прямого лазерного выращивания, из-за недостаточной герметичности камеры и/или недостаточной чистоты подаваемого в камеру аргона. Плохое качество защитной атмосферы рабочей камеры и, как следствие, окисление образцов может стать причиной снижения уровня механических характеристик образцов.

Из полученных выращенных заготовок методом электроэрозионной проволочной резки были вырезаны образцы с размерами (ДхШ) 24х6 мм и высотой 40 мм. Полученные образцы были механически отполированы и протравлены концентрированной плавиковой кислотой (HF) для исследования микроструктуры образцов. Механической обработке фрезерованием подвергалась сторона с длиной 24 мм и шириной 6 мм. Оборудование, используемое для проведения экспериментов: вертикально фрезерный станок с ЧПУ ALZMETALLBAZ 15 CNC; пьезо-многокомпонентный динамометр Kistler Тип 9257B; измерение шероховатости поверхности образцов проводилось на профилографе Hommel-EtamicTesterW55; инструмент: концевая твёрдосплавная монолитная фреза фирмы Seco JHP 770100E2R08Q0Z4A – SIRA диаметром 10 мм, количество зубьев  $z = 4$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

#### Исследование микроструктуры образцов

Микроструктура выращенного образца из титанового сплава VT20 представляет собой комбинацию игольчатых  $\alpha$ -зерен и столбчатых  $\beta$ -зерен (рис. 2). Появление в его структуре мартенсита ( $\alpha'$ -фаза) можно объяснить высокими температурами нагрева и быстрого охлаждения, присущими процессу сплавления.

Таблица 1

Химический состав сплава VT20 в %

Ti	Al	Mo	V	Zr	C	Fe	Si	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Сумма прочих примесей	Примечание
Основа	5,5–7,0	0,5–2,0	0,8–2,5	1,5–2,5	0,10	0,25	0,15	0,15	0,05	0,015	0,30	по справочнику
86,64	7,3	1,95	1,91	2,21	–	–	–	–	–	–	–	порошок
85,795	6,8	1,85	2,38	2,35	0,09	0,20	0,15	0,13	0,045	0,01	0,20	пруток

Таблица 2

Режимы изготовления образцов

Мощность, Вт	Скорость перемещения, мм/с	Расход порошка, г/мин	Диаметр пятна, мм	Шаг слоя, мм	Расстояние между соплом и образцом, мм	Подача порошка 70%, г/мин	Расход не-сухого газа, л/мин
1100	7	3,6–7,2	1,2	0,7	2–6	28	8



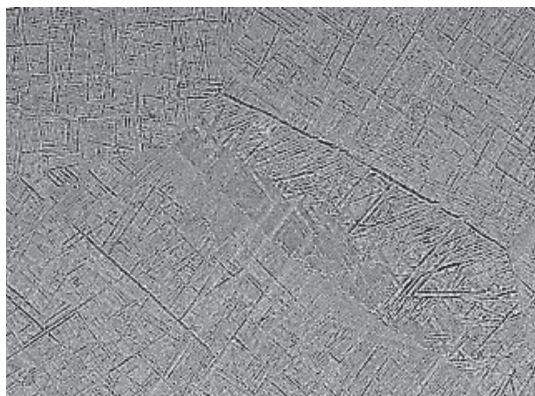


Рис. 2. Микроструктура исходного образца из сплава BT20 x300 [2]

При затвердевании скорость охлаждения превышает 1000 °С/мин, что обычно приводит к небольшому размеру зерна. Данные условия обработки удовлетворяют требованиям к образованию мартенситных образований [9–11]. Границы β-зерен удлиняются с повышением температуры, что может привести к кривизне зерен.

*Исследование шероховатости поверхности образцов при обработке фрезерованием*

Режимы обработки резанием и результаты измерения шероховатости поверхности образца из титанового сплава BT20 после обработки приведены в табл. 3. Шероховатость исходного образца после электроэрозионной проволочной резки составляет Ra 1,6 мкм. Во всех опытах после выставления и закрепления образца на столе динамометра Kistler производили калибровочный проход, он выполняется всегда на одном и том же режиме резания (F = 0,1 мм/зуб,

V = 80 м/мин, t = 0,1 мм). Калибровочный проход необходим для обеспечения однотипных условий для проведения эксперимента, таких как шероховатость исходной поверхности (Ra 0,22 мкм), вылет заготовки 3,0 мм.

При измерении сил резания с помощью динамометрического стола Kistler были получены графические зависимости составляющих Fx, Fy, Fz силы резания от времени для сплава BT20 по 8 каналам измерения. Далее выбираются только зависимости составляющих Fx, Fy, Fz силы резания. Составляющие силы получают отрицательными, так как направление составляющих сил противоположно положительным направлениям осей динамометрического стола. В расчетах учитывались только значения сил, т.е. знак не учитывался. С помощью программного обеспечения динамометрического стола определяется результирующая сила резания, используя инструмент масштабирования, выбираем часть зависимости для одного зуба, т.е. часть времени, в течение которого в контакте с образцом находится только один зуб фрезы. Определяем площадь под кривой результирующей силы резания для одного зуба и находим действительное усилие резания, которое действует на зуб, действия повторяются для каждого режима обработки.

Найдем производительность обработки для каждого из опытов, результаты приведены в табл. 3, по формуле

$$MRR = t \cdot F \cdot V \cdot 1000,$$

где t – глубина резания, мм;  
F – подача, мм/зуб;  
V – скорость резания, м/мин.

**Таблица 3**

План проведения эксперимента, режимы фрезерования, шероховатость и производительность

№ опыта	t, мм	F, мм/зуб	V, м/мин	Ra, мкм	MRR, мм <sup>3</sup> /мин
1	0,1	0,05	60	0,16	300
2	0,3			0,18	900
3	0,5			0,14	1500
4	1,0			0,14	3000
5	0,1	0,1		0,21	600
6	0,3			0,22	1800
7	0,5			0,19	3000
8	1,0			0,22	6000
9	0,1	0,2		0,29	1200
10	0,3			0,32	3600
11	0,5			0,27	6000
12	1,0			0,29	12000

Окончание табл. 3

№ опыта	t, мм	F, мм/зуб	V, м/мин	Ra, мкм	MRR, мм <sup>3</sup> /мин
13	0,1	0,05	80	0,20	400
14	0,3			0,12	1200
15	0,5			0,18	2000
16	1,0			0,17	4000
17	0,1	0,1		0,20	800
18	0,3			0,20	2400
19	0,5			0,25	4000
20	1,0			0,22	8000
21	0,1	0,2		0,23	1600
22	0,3			0,29	4800
23	0,5			0,21	8000
24	1,0			0,25	16000
25	0,1	0,05	100	0,19	500
26	0,3			0,17	1500
27	0,5			0,19	2500
28	1,0			0,17	5000
29	0,1	0,1		0,22	1000
30	0,3			0,27	3000
31	0,5			0,25	5000
32	1,0			0,25	10000
33	0,1	0,2		0,23	2000
34	0,3			0,26	6000
35	0,5			0,21	10000
36	1,0			0,20	20000

Из анализа полученных результатов (табл. 3) видно, что наименьшая шероховатость поверхности образца получается при толщине срезаемого слоя 0,3 мм, скорости резания 80 м/мин и подаче 0,05 мм/зуб.

С увеличением подачи и скорости резания шероховатость поверхности образцов возрастает. По результатам расчета производительности можно сделать вывод, что наибольшая производительность наблюдается в опыте № 36 при получаемой шероховатости поверхности Ra 0,20 мкм.

#### Исследование микротвёрдости поверхности образцов

Исследование микротвёрдости проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3 с нагрузкой 200 г, алмазной пирамидой с углом при вершине 136°. На рис. 3 изображена схема измерения микротвёрдости. В районе каждой точки производили три испытания, из полученных значений находили среднеарифметическое значение. Результаты представлены в табл. 4.

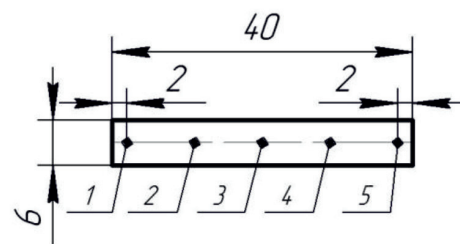


Рис. 3. Схема измерения твердости

**Таблица 4**  
Результаты измерений микротвёрдости на приборе ПМТ-3

№ точки измерения	Среднее значение микротвёрдости, кг/мм <sup>2</sup>	
	поверхность после фрезерования	исходная поверхность
1	33,5	35,0
2	33,0	35,5
3	34,0	35,5
4	33,5	35,0
5	33,0	34,5

Анализируя данные табл. 4, видно, что микротвёрдость исходной поверхности, полученной при выращивании образцов, выше микротвёрдости поверхности образцов после обработки фрезерованием. Это можно объяснить локальным характером нагрева металла поверхностного слоя. Тепло, возникающее в процессе сплавления металлического порошка между собой и с предыдущим слоем, а также при пластической деформации и трения режущих кромок инструмента об заготовку при фрезеровании, оказывает существенное влияние на состояние поверхностного слоя. Тепло, с одной стороны, повышает пластичность металла и способствует более глубокому упрочнению, с другой стороны, ускоряет процесс разупрочнения металла. Следовательно, характер изменения глубины и степени упрочнения поверхностного слоя образца зависит от количественного соотношения протекающих процессов упрочнения и разупрочнения. Важным источником упрочнения поверхностного слоя могут служить фазовые превращения, ведущие к закалке металла.

#### Выводы

В ходе исследования влияния обработки фрезерованием на поверхностный слой образцов из титанового сплава VT20, полученных методом прямого лазерного выращивания, были сделаны следующие выводы:

- анализ действительного усилия резания, для каждого режима обработки свидетельствует, что с увеличением интенсивности обработки и ростом температуры резания (относительная температура уменьшается) материал испытывает разупрочнение в пределах 4% для рассматриваемых режимов обработки;
- микроструктура сплава представляет собой мелкозернистую структуру, наблюдаются мартенситные образования;
- наименьшая шероховатость поверхности обработанного образца получается на режимах резания  $t = 0,3$  мм,  $V = 80$  м/мин и  $F = 0,05$  мм/зуб;
- микротвёрдость поверхности образца после обработки фрезерованием оказалась ниже, чем у исходной поверхности образца. То можно объяснить тепловыми воздействиями на образец при выращивании и последующей механической обработке.

*Исследования были проведены на оборудовании ЦКП САМ-технологий (RFMEFI59314X0003). Эта работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».*

#### Список литературы

1. Деменок В.А., Шаронов В.О., Балякин А.В. Проведение испытаний наплавленных слоёв полученных методом прямого лазерного выращивания на коррозионную стойкость // Вестник РГАТУ. – 2017. – № 2 (41). – С. 370–375.
2. Создание технологии высокоскоростного изготовления деталей и компонентов авиационных двигателей методами гетерофазной порошковой металлургии: Отчет II о составной части прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках; рук. С.П. Мурзин; исполн. В.Г. Смелов и др. – Самара, 2015. – 61 с. – Инв. № 201х-122-16г.
3. Создание технологии высокоскоростного изготовления деталей и компонентов авиационных двигателей методами гетерофазной порошковой металлургии: Отчет III о составной части прикладных научных исследованиях и экспериментальных разработках; рук. С.П. Мурзин; исполн. В.Г. Смелов и др. – Самара, 2016. – 233 с. – Инв. № 201х-122-16г.
4. Глухов В.В. Экономическая эффективность технологии прямого лазерного выращивания в промышленности / В.В. Глухов, Г.А. Туричин // Теоретические основы формирования промышленной политики. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015. – С. 176–190.
5. Быковский Д.П. Применение технологии прямого лазерного выращивания для изготовления образцов из нержавеющей стали и исследование их механических свойств / Д.П. Быковский, В.Н. Петровский, А.В. Осинцев [и др.] // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: сборник докладов II Международной конференции. – М., 2016. – С. 30.
6. Hamedon Z. Hot stamping of titanium alloy sheet using resistance heating / Z. Hamedon, K.-I. Mori, T. Maeno, Y. Yamashita // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – № 5. – С. 12–15.
7. Sirvin Q. Mechanical Behavior And Modelisation Of Ti-6Al-4V Titanium Sheet Under Hot Stamping Conditions / Q. Sirvin, Vincent Velay, R Bonnaire, Luc Penazzi. – M: Universit'e de Toulouse. – 2017. – С. 7.
8. Cabrini M. Evaluation of corrosion resistance of Al-10Si-Mg alloy obtained by means of Direct Metal Laser Sintering / M. Cabrini // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 231. – С. 326–335.
9. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное издание. – М.: Изд-во Уральского университета, 2014. – С. 138.
10. C. Qiu, N. Adkins, M. Attallah. Microstructure And Tensile Properties Of Selectively Laser-Melted And Of Hiped Laser-Melted Ti-6Al-4V: Materials Science and Engineering. – 2013. – № 578. – С. 230–239.
11. W. Xu. Additive Manufacturing Of Strong And Ductile Ti-6Al-4V By Selective Laser Melting Via In Situ Martensite Decomposition: Acta Materialia. – 2015. – № 85. – С. 74–84.