

## ХИМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Е. И. Жученко<sup>1</sup>, А. В. Балякин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Zhuchenkozhenya@yandex.ru, <sup>2</sup> balaykinav@ssau.ru

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва»  
(Самарский университет)

**Аннотация.** Рассматривается методом постобработки изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления титанового порошка ВТ6, по средствам химического полирования в растворе плавиковой и азотной кислот после термической обработки.

**Ключевые слова:** селективное лазерное сплавление; титановые сплавы; постобработка; качество поверхностного слоя; шероховатость; 3D-печать; полировка; термообработка.

Титановые сплавы являются важнейшими конструкционными материалами, применяемыми в различных отраслях промышленности. Они обладают низкой плотностью, высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, в том числе в агрессивных средах, жаропрочностью и другими достоинствами. Титановые сплавы – незаменимый конструкционный материал в отраслях промышленности, где масса изделия играет доминирующую роль, а именно: в авиационном двигателестроении, самолетостроении, ракетостроении и т.д.

Вся история современного газотурбинного двигателестроения неразрывно связана с появлением новых материалов и в первую очередь жаропрочных и титановых сплавов. Эти материалы в значительной мере заменили алюминиевые сплавы, жаростойкие и жаропрочные стали.

Применение жаропрочных титановых сплавов оправдано в интервале температур от 250 до 600 °С, когда легкие алюминиевые и магниевые сплавы уже неработоспособны, а стали и никелевые сплавы уступают титановым сплавам по удельной прочности. Титановые сплавы обладают термической стабильностью и не охрупчиваются в условиях длительной работы при температурах до 400...500 °С. Вместе с тем, несмотря на указанные преимущества титановых сплавов,

по сравнению с другими материалами, они имеют ряд недостатков, одним из которых является плохая обрабатываемость резанием. Коэффициент обрабатываемости у этих сплавов в зависимости от марки колеблется в пределах от 0,8 до 0,45.

В отличие от формообразования деталей методами лезвийной и абразивной обработки, где съём припуска производится в виде стружки, аддитивные технологии производства позволяют изготавливать сложнофасонные детали путем последовательного сплавления слоев порошкового материала лучом лазера по заданной программе в соответствии с трехмерной моделью, обеспечивая значительную экономию в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Аддитивное производство деталей из сплавов на основе Ni- и Ti в основном осуществляется методом селективного лазерного сплавления (SLM). При лазерной обработке поглощение высокоинтенсивного когерентного светового излучения приводит к расплавлению частиц металлического порошка и образованию непрерывной связи между предыдущими и последующими дорожками при охлаждении от температуры расплава. В установках SLM для предотвращения окисления расплавленного материала используется находящийся при не-

большом избыточном давлении инертный газ. Механизмы затвердевания контролируются поведением потока расплава и смачиваемостью и могут варьироваться с помощью применяемой стратегии сканирования. Во время затвердевания размер бассейна расплава определяется, главным образом, теплопроводностью через твердое тело, поскольку теплопроводность окружающего металлического порошка существенно ниже [1]. В случае недостаточного контакта между соседними слоями может возникнуть неустойчивость процесса, вызывающая выброс капель расплава.

Следует отметить, что существующие технологии СЛС достаточно часто не обеспечивают требований к механическим характеристикам детали, а также к точности размеров и качеству поверхности [2]. А это означает, что для обеспечения требований, предъявленным к указанным ранее параметрам, необходимы термо- и постобработка.

В представленной работе выполнены исследования по оценке влияния процесса химического полирования растворами фтористоводородной и азотной кислот на качество обрабатываемых поверхностей как не термообработанных, так и термообработанных образцов из титанового сплава ВТ6, полученных методом селективного лазерного сплавления. Сплав ВТ6 относится к системе легирования титан-алюминий-ванадий, имеет двухфазную ( $\alpha+\beta$ ) структуру и подвергается упрочнению при термической обработке, включающей закалку и неполный отжиг. Такая термообработка позволяет повысить его прочность при некотором снижении пластичности [1, 2].

Исследуемые образцы были получены методом селективного лазерного сплавления на установке SLM 280 [3] и имели следующие размеры: длину – 35 мм, ширину – 10 мм, толщину – 2 мм. Выращивание осуществлялось на режиме: мощность лазерного излучения  $P = 275$  Вт, скорость сканирования  $S = 805$  мм/с. Перед полированием образцов были измерены их масса и шероховатость поверхности в продольном и поперечном направлениях.

Измерение массы образцов осуществлялось с помощью аналитических весов модели САРТО ГОСМ ЛВ 210-А, а измерение шероховатости поверхности посредством автоматизированного профилометра-профилографа модель БВ-7669.

Шероховатость поверхности не термообработанных образцов после химического полирования их в водном растворе 10 % фтористоводородной и 10 % азотной кислот приведена табл. 1.

На поверхности не термообработанных образцов при химическом полировании их в водном растворе кислот, содержащем 10 % HF и 10 % HNO<sub>3</sub>, проявились слоистая структура, унаследованная от способа изготовления образцов при выращивании, а также неровности в виде пиков, которые не поддаются химическому травлению. Для устранения выявленных дефектов полирования было принято решение по термообработке образцов на режимах, представленных в табл. 2.

Удаление окалины, образующейся при нагревах до 700 °С (образец № 2, табл. 2), было выполнено по схеме, предусматривающей обработку деталей в водных растворах щелочей с последующим травлением в растворе кислот, состав, концентрация и режимы травления которых приведены и описаны авторами в [4].

У титановых образцов, прошедших нагрев свыше 700 °С (образцы №№ 1, 3–6, табл. 2), удаление окалины осуществлялось механическим путем посредством металлической щетки. Данный процесс достаточно широко используется для упрочнения поверхностей и снижения величины шероховатости поверхности [5,6].

Таблица 1

Шероховатость поверхности не термообработанных образцов до и после химического полирования в растворе 10% HF и 10% HNO<sub>3</sub>

Рас- твор	Шероховатость поверхности образцов, мкм			
	До полирования		После полирования	
	Про- дольная	Попе- речная	Про- дольная	Попе- речная
10% HF+ 10% HNO <sub>3</sub>	Ra = 4,13 Rz =31,6	Ra =4,46 Rz =35,60	Ra = 0,07 Rz =0,89	Ra = 0,15 Rz =1,61

Таблица 2

## Режимы термообработки

№ образца и режима	Вид термообработки	Температура, °С	Выдержка, час	Условия охлаждения
1	Отжиг	650	24	с печью
	Закалка	930	0,5	вода
2	Отжиг	650	24	с печью
	Закалка	930	0,5	вода
3	Отжиг	650	24	с печью
	Закалка	930	0,5	масло
4	Отжиг	650	24	с печью
	Закалка	930	0,5	масло
5	Отжиг	650	24	с печью
	Закалка	930	0,5	вода
6	Отжиг	650	24	с печью
	Закалка	930	0,5	вода

В качестве инструмента использовалась круглая металлическая щетка диаметром 75 мм и шириной до 10 мм из гофрированной стальной проволоки диаметром 0,3 мм, а в качестве привода для вращения щетки применялась электрическая дрель Skil 6360 мощностью 650 Вт. Обработка велась при скорости вращения щетки  $v_{щ} = 15,3$  м/с (3900 об/мин при допустимой частоте вращения щетки, равной 4500 об/мин). Обработка щеткой осуществлялась вдоль образца вручную. При этом в процессе обработки было выполнено 12 двойных ходов.

Исследования показали, что исходная шероховатость поверхности у образцов составила в среднем  $Ra = 4,08$  мкм, а величина исходных окружных растягивающих остаточных напряжений 1 МПа.

Измерение указанных ранее параметров у образцов после обработки щеткой показало, что шероховатость поверхности уменьшилась в 2,8 раза и составила  $Ra = 1,73$  мкм, а в поверхностном слое были сформированы незначительные сжимающие остаточные напряжения с максимумом, равным 17 МПа и глубиной залегания – 105 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ХИМИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ

Результаты химического полирования образцов, подвергнутых термообработке на режимах, указанных в табл. 2, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные и результаты химического полирования термически обработанных образцов в водных растворах кислот, содержащих 5% HF+10% HNO<sub>3</sub> и 10% HF+10% HNO<sub>3</sub>

№ режима термообработки	Исходная толщина образца, мм	Толщина образца до травления, мм	Толщина образца после травления, мм	Средняя потеря толщины образца, мм	Скорость травления, мм/мин
1	2,14	2,09	1,87	0,22	0,01
2	2,14	2,12	1,86	0,26	0,01
3	2,14	2,10	1,89	0,21	0,01
4	2,14	2,08	1,94	0,14	0,005
5	2,15	2,09	1,96	0,13	0,005
6	2,15	2,12	1,79	0,33	0,005

Таблица 4

Исходные данные о массе и результаты химического полирования термически обработанных образцов в водных растворах кислот, содержащих 5% HF+10% HNO<sub>3</sub> и 10% HF+10% HNO<sub>3</sub>

№ режима термообработки	Масса образца, грамм				Время травления, мин	
	до обработки	после термообработки	После снятия окислы	После химической полировки	5% HF + 10% HNO <sub>3</sub>	10% HF + 10% HNO <sub>3</sub>
1	2,7	2,6	2,5	2,1	7	15
2	2,7	2,7	2,6	2,0	7	15
3	2,7	2,6	2,6	2,1	7	15
4	2,7	2,5	2,4	1,9	7	15
5	2,7	2,6	2,6	2,3	7	15
6	2,7	2,6	2,6	1,9	7	15

Таблица 5

## Исходные данные о шероховатости и ее изменение после термической обработки

№ режима термообработки	Шероховатость поверхности образца, мкм			
	До термической обработки		После термической обработки	
	Вдоль треков	Поперек треков	Вдоль треков	Поперек треков
1	Ra = 3,74 Rz = 25,6	Ra = 5,38 Rz = 36,6	Ra = 3,84 Rz = 28,4	Ra = 4,55 Rz = 39,1
2	Ra = 4,57 Rz = 32,9	Ra = 5,19 Rz = 35,6	Ra = 4,19 Rz = 34,6	Ra = 3,89 Rz = 34,0

Окончание табл. 5

3	Ra = 3,99 Rz = 30,2	Ra = 5,01 Rz = 32,8	Ra = 4,18 Rz = 32,3	Ra = 3,14 Rz = 34,8
4	Ra = 3,77 Rz = 28,5	Ra = 4,32 Rz = 31,2	Ra = 4,01 Rz = 28,6	Ra = 3,05 Rz = 29,9
5	Ra = 4,17 Rz = 31,3	Ra = 4,62 Rz = 31,4	Ra = 4,41 Rz = 35,2	Ra = 5,22 Rz = 36,1
6	Ra = 4,26 Rz = 34,5	Ra = 5,35 Rz = 38,1	Ra = 4,36 Rz = 31,3	Ra = 3,28 Rz = 28,8

Примечание: \* Удаление окислыни проходило в щелочном растворе без механической обработки

Таблица 6

**Данные об изменении шероховатости термобработанных образцов после механического удаления окислыни и результаты химического полирования термически обработанных образцов в водных растворах кислот, содержащих 5% HF+10% HNO<sub>3</sub> и 10% HF+10% HNO<sub>3</sub>**

№ режима термообработки	Шероховатость поверхности образца, мкм			
	После механической обработки		После химического полирования	
	Вдоль треков	Поперек треков	Вдоль треков	Поперек треков
1	Ra = 2,07 Rz = 16,8	Ra = 2,95 Rz = 22,2	Ra = 0,27 Rz = 2,38	Ra = 0,40 Rz = 2,98
2	Ra = 1,73* Rz = 13,5*	Ra = 2,83* Rz = 20,8*	Ra = 0,35 Rz = 2,52	Ra = 0,55 Rz = 4,67
3	Ra = 1,58 Rz = 13,2	Ra = 3,41 Rz = 27,8	Ra = 0,56 Rz = 5,06	Ra = 0,84 Rz = 6,55
4	Ra = 2,13 Rz = 18,0	Ra = 3,16 Rz = 25,4	Ra = 0,38 Rz = 3,68	Ra = 0,49 Rz = 3,69
5	Ra = 1,47 Rz = 12,8	Ra = 1,65 Rz = 12,5	Ra = 0,74 Rz = 12,5	Ra = 1,28 Rz = 16,4
6	Ra = 1,41 Rz = 11,9	Ra = 2,45 Rz = 19,7	Ra = 0,39 Rz = 3,88	Ra = 0,76 Rz = 7,92

Примечание: \* Удаление окислыни проходило в щелочном растворе без механической обработки

Таблица 7

#### Коэффициенты изменения шероховатости

№ режима термообработки	Коэффициент изменения шероховатости	
	Вдоль треков сканирования	Поперек треков сканирования
1	Ra 13,85; Rz 10,76	Ra 13,45; Rz 12,28
2	Ra 13,06; Rz 13,06	Ra 9,44; Rz 7,62
3	Ra 7,13; Rz 5,97	Ra 5,56; Rz 5,01
4	Ra 9,92; Rz 7,74	Ra 8,82; Rz 8,46
5	Ra 5,64; Rz 2,50	Ra 3,61; Rz 1,91
6	Ra 10,92; Rz 8,89	Ra 7,04; Rz 4,81

Поверхность исследуемых образцов после травления и последующей обезводоро-

живающей обработки – гладкая, блестящая или слегка матовая, без растравливания; съем металла по всей поверхности детали равномерный.

#### ВЫВОДЫ

1. Металлические щетки могут быть использованы для предварительной постобработки деталей, изготовленных методом СЛС, причем как не термообработанных, так и термообработанных.

2. Процесс химического полирования водными растворами кислот (5% HF+10% HNO<sub>3</sub> и 10% HF+10% HNO<sub>3</sub>) применим для предварительной (снятия окислыни) и окончательной обработки деталей из титановых сплавов, выращенных методом СЛС. При этом при скорости травления, равной 0,01 мм/мин, обеспечивается равномерное полирование поверхности, а содержание водорода в поверхности после обработки не превышает концентрацию водорода в исходном материале.

3. Для обеспечения стабильных условий травления в течение всего времени обработки (0,5...1,0 часа) необходимо выполнение следующих условий:

- отношение объема раствора к площади обрабатываемой поверхности должно составлять 4:1 л/дм<sup>2</sup>;
- ванна для травления должна иметь наружное охлаждение;
- регулярное перемешивание раствора осуществляется либо механическим путем, либо за счет барботирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полкин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛЬС-Мати, 2009, 520 С. [Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. Directory. - M: VILS - MATI, 2009, 520 p.]
2. Авиационные материалы [Текст]: справочник: в 9 т. заслуж. деятель науки и техники РСФСР, член корр. АН СССР А. Т. Туманова; авиац. индустриальный СССР. Всесоюзный. Науч.-исслед. ин-т авиац. материальный. - 6-е изд., перераб. и добавить. - Москва: ОНТИ, 1973. - 22 см. Том. 5: сплавы магния и титана / научный. эд. д-ра техн. наук МБ Альтман, д-р техн. наук С. Г. Глазунов, д-р техн. наук С. И. Кишкина. - 1973. - 583 С. : il. [aviation materials [text]: a handbook: at 9 tons / under total. ed. merits activities science and technology of the RSFSR, corr. USSR academy of sciences a.t. tumanova; mv.

aviats. industrial USSR. all-union. nauch.-issled. in-t aviats. materials. - 6th ed., pererab. and add. - moscow: ONTI, 1973. - 22 cm. vol. 5: magnesium and titanium alloys / scientific. ed. dr. tech. sciences mb altman, dr. tech. sciences s., g. glazunov, dr. tech. sciences s.i. kishkina. - 1973. - 583 s. : il.]

3. **Сотов А. В.**, Проничев Н. Д., Смелов В. Г. и др. Разработка методов проектирования технологических процессов изготовления деталей газотурбинного двигателя методом селективного лазерного легирования порошка жаропрочного сплава ВВ751П // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Том. 19. Номер 4. П. 96-104. [A. V. Sotov., N. D. Pronichev., V. G. Smelov. Et al. Development of methods for designing technological processes for manufacturing parts of a gas turbine engine by the method of selective laser alloying of powder of high-temperature alloy Vv751p // proceedings of the samara scientific center of the russian academy of sciences. 2017. Vol. 19. No. 4. P. 96-104.]

4. **Grilhes S. Ya.** Обезжиривание, травление и полировка металлов / ред. П. М. Вячеславов. - Эд. 5-й, переработ. и доб. Л. : Машиностроение, Ленинград. Сентябрь., 1983. - 101 С., Плохо. - (Б-чка гальванотехника; вып. 1). [S.Ya Grilhes. Degreasing, pickling and polishing of metals / ed. Pm Vyacheslavov. - ed. 5th, pererabot. And add. L. : mechanical engineering, leningrad. Sep., 1983. - 101 p., ill. - (bchka electroplating; vol. 1)]

5. **Рыковский Б. П.** Локальное упрочнение деталей поверхностным упрочнением / Б. П. Рыковский, В. А. Смирнов, Г. М. Щетинин. - М. : Машиностроение, 1985. - 152 С. [B.P Rykovsky. Local hardening of parts by surface hardening / b.p. Rykovsky, v.a. Smirnov, g.m. Schetinin. - m. : mashinostroenie, 1985. - 152 p.]

6. **Уланов Б. Н.** Регулирование шероховатости поверхности обработкой металлическими щетками / Б. Н. Уланов, К. Ф. Митряев // Высокоэффективные методы механической обработки жаропрочных и титановых сплавов: Интерст. Сидел - Куйбышев: КуАИ, 1981. - р. 146-149. [B.N. Ulanov., Regulation of surface roughness by treatment with metal brushes / b.n. Ulanov, k.f. Mitryaev // high efficiency methods for the mechanical treatment of high-temperature and titanium alloys: interst. Sat - kuibyshev: kuai, 1981. - p. 146-149.]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЖУЧЕНКО Евгений Игоревич**, магистрант каф. ТПД.

**БАЛЯКИН Андрей Владимирович** старший преподаватель каф. ТПД.

#### METADATA

**Title:** Chemical polishing of thermal-developed details from titanium alloy Ti6Al4V, manufactured by the selective laser alloying method

**Authors:** E. I. Zhuchenko <sup>1</sup>, A. V. Balyakin <sup>2</sup>

**Affiliation:**

Samara national research university, Russia.

**Email:** <sup>1</sup> Zhuchenkozhenya@yandex.ru, <sup>2</sup> balaykinav@ssau.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (21), pp. 47-51, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** It is considered by the method of post-processing of products obtained by the method of selective laser alloying of titanium powder VT6 by means of chemical polishing in a solution of hydrofluoric and nitric acids after thermal treatment.

**Key words:** selective laser melting; titanium alloys; post-processing; finishing operations; surface; surface layer quality; roughness; 3D printing; polishing; heat treatment

**About authors:**

**ZHUCHENKO, Evgeny Igorevich**, Master student 2yaers, Samara national research university, Russia

**BALYAKIN Andrei Vladimirovich**, Senior Lecturer Samara national research university, Russia