

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-6-76-83>

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti – 6Al – 4V, ПОЛУЧЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© Михаил Юрьевич Грязнов, Сергей Викторович Шотин, Владимир Николаевич Чувильдеев, Александра Владимировна Семенычева*

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Россия, 603022, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, д. 23; *e-mail: semenycheva@nifti.unn.ru

Статья поступила 20 октября 2023 г. Поступила после доработки 14 ноября 2023 г. Принята к публикации 29 ноября 2023 г.

Исследовано влияние различных видов постобработки на усталостные характеристики образцов титанового сплава Ti – 6Al – 4V, полученных с использованием технологии послойного лазерного сплавления. Проведено сравнение значений усталостной долговечности при испытаниях на малоцикловую усталость образцов титанового сплава Ti – 6Al – 4V, непосредственно после послойного лазерного сплавления и после применения токарной, гидроабразивной и виброгалтовочной обработок. Шероховатость поверхности после послойного лазерного сплавления $Ra \approx 8$ мкм, нанотвердость 5,1 ГПа. Эти образцы обладают низкой усталостной долговечностью. После виброгалтовочной обработки шероховатость $Ra \approx 3,5$ мкм, при этом усталостные характеристики не меняются. После токарной обработки получена минимальная шероховатость $Ra \approx 0,1$ мкм и нанотвердость 5 ГПа, при этом несколько повышаются усталостные характеристики. Максимальные усталостные свойства получены на образцах, созданных методом послойного лазерного сплавления с последующей гидроабразивной обработкой поверхности, благодаря которой удается снизить шероховатость Ra до ~ 1 мкм и повысить нанотвердость приповерхностной зоны до 6,1 ГПа. Одной из причин существенного повышения усталостных характеристик после гидроабразивной обработки является упрочнение приповерхностного слоя материала, который становится эффективным препятствием возникновения и распространения микротрещин. Гидроабразивная обработка изделий, полученных с помощью технологии послойного лазерного сплавления, позволяет повысить усталостные характеристики и улучшить качество поверхности образцов титанового сплава Ti – 6Al – 4V, для применения в биомедицине.

Ключевые слова: сплав Ti – 6Al – 4V; аддитивные технологии; технология послойного лазерного сплавления; шероховатость; гидроабразивная обработка; усталостные свойства.

EFFECT OF SURFACE CONDITION ON THE FATIGUE CHARACTERISTICS OF Ti – 6Al – 4V, TITANIUM ALLOY PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING

© Mikhail Yu. Gryaznov, Sergey V. Shotin, Vladimir N. Chuvildeev, Aleksandra V. Semenycheva*

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 prosp. Gagarina, Nizhny Novgorod, 603022, Russia; *e-mail: semenycheva@nifti.unn.ru

Received October 20, 2023. Revised November 14, 2023. Accepted November 29, 2023.

The effect of various types of surface post-treatment on the fatigue characteristics of Ti – 6Al – 4V titanium alloy samples produced by selective laser melting has been studied. The values of the low-cycle fatigue of Ti – 6Al – 4V titanium alloy samples as built and after turning, waterjet and vibro-grinding treatment were compared. The surface roughness Ra nano-hardness after selective laser melting were 8 μm and 5.1 GPa, respectively. These samples have a low fatigue life. The surface roughness Ra after vibro-grinding treatment decreased to 3.5 μm , whereas the fatigue characteristics remained the same. After turning, the minimum roughness value 0.1 μm at the nano-hardness of 5 GPa were obtained. This treatment allows a slight increase in the fatigue characteristics. However, the maximum fatigue properties were obtained on samples after waterjet treatment (Ra attained 1 μm and the nano-hardness of the subsurface zone increased to 6.1 GPa). One of the reasons for a significant increase in the fatigue characteristics after waterjet treatment is hardening of the surface layer of the material, which becomes an effect-

ive obstacle to the occurrence and spread of microcracks. Waterjet treatment of samples produced by selective laser melting makes it possible to solve the problem of increasing fatigue characteristics and improving the surface quality of Ti – 6Al – 4V, titanium alloy products to be used in biomedicine.

Keywords: Ti – 6Al – 4V, alloy; additive technologies; selective laser melting; roughness; waterjet treatment; fatigue properties.

Введение

Титановые сплавы широко используются во многих отраслях промышленности благодаря хорошему сочетанию физико-механических и эксплуатационных характеристик, в частности, высокой удельной прочности и коррозионной стойкости [1 – 5]. Основная проблема при изготовлении изделий из титановых сплавов заключается в сложности их обработки [6, 7]. Новой альтернативной технологией формообразования труднообрабатываемых сплавов может стать технология послойного лазерного сплавления (ПЛС) [2, 8 – 10]. Так, в работах [8, 9, 11] показано, что стандартные механические характеристики ПЛС-образцов титанового сплава Ti – 6Al – 4V, не уступают свойствам аналогов, полученных с использованием традиционных технологий обработки металлов давлением. Для практического применения большой интерес представляют усталостные свойства ПЛС-материалов, изучению которых уделяется недостаточное внимание. Как известно, одним из важных факторов, влияющих на усталостное поведение, является состояние поверхности, так как усталостное разрушение материала — следствие зарождения поверхностных микротрещин. Важность управления состоянием поверхности, в частности, в связи с ее влиянием на усталостные характеристики ПЛС-изделий, связана с развивающейся в настоящее время концепцией создания специальных поверхностей 3D-эндопротезов, в том числе из сплава Ti – 6Al – 4V, [12 – 15]. Многие исследователи определяют свойства поверхности имплантата как основной фактор для достижения эффективного взаимодействия имплантата с тканью и остеоинтеграции [16]. Доказано, что имплантаты с оптимальной шероховатостью (например, $Ra \approx 2 – 4$ мкм [17]) усиливают дифференцировку костеобразующих клеток (остеобластов), снижают активность разрушающих кость клеток (остеокластов) и способствуют прикреплению кости к поверхности имплантата и ее минерализации [17 – 19]. В данной работе проведено комплексное изучение влияния постобработки поверхности ПЛС-образцов титанового сплава Ti – 6Al – 4V, на его усталостные характеристики.

Объект исследования

Объектами исследований являются образцы титанового сплава Ti – 6Al – 4V, изготовленные

по технологии послойного лазерного сплавления с использованием установки MTT Realizer SLM 100. Используются следующие основные параметры сплавления: мощность лазера 100 Вт; скорость сканирования 300 мм/с; расстояние между линиями штриховки сечения 120 мкм; поворот линий штриховки сечения в каждом последующем слое 90° .

Методика исследования структуры и свойств

Гранулометрический состав порошка титанового сплава Ti – 6Al – 4V, (производитель “TLS Technik”) исследован на лазерном анализаторе размера частиц SALD-2300 (Shimadzu). Средний размер частиц составляет 45 мкм, величина D75 не превышает 55 мкм. Химический состав порошка в соответствии с сертификатом производителя, % масс.: 6,3 Al; 4,5 V; 0,2 Fe; 0,15 O; 0,05 C; 0,03 N; 0,005 H; основа Ti.

Проведены исследования структурных, механических и усталостных характеристик ПЛС-образцов в исходном состоянии и после различных видов постобработки поверхности: токарной обработки на станке DMTG CDS6250B, виброгалтовочной обработки на машине CAF Vibro Plus-ZHM-60A с керамическим наполнителем и гидроабразивной обработки на установке MC-40СК (ООО «Гидроабразив»).

Усталостные испытания проведены на сервогидравлической машине Zwick/Amsler HC25 согласно ГОСТ 25.502–79 на образцах круглого сечения диаметром 5 мм без надреза (концентратора). Использовалась мягкая схема нагружения в условиях циклического растяжения-сжатия с частотой $f = 3$ Гц и коэффициентом асимметрии цикла напряжений $R_o = 0,1$. Уровень максимальных напряжений в цикле составлял 750 МПа. Для структурных исследований использованы оптический микроскоп Leica IM DRM и растровый электронный микроскоп Jeol JSM-6490. Измерение шероховатости поверхности проведено на портативном измерителе шероховатости TR 100 (TimeGroup). Нанотвердость определена с помощью зондовой системы для измерений механических параметров методом непрерывного вдавливания Agilent Nano Indenter G200.

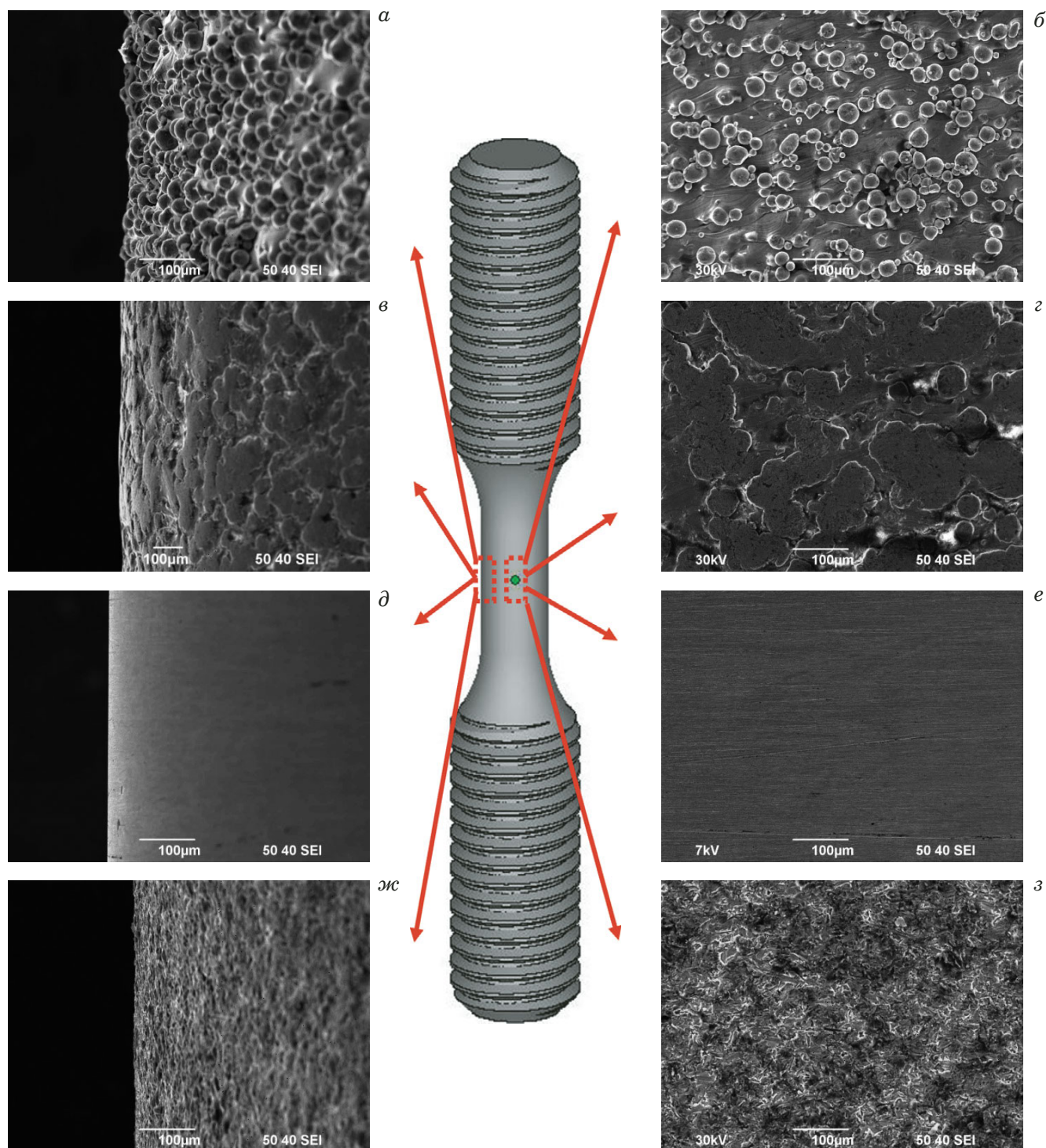


Рис. 1. Различные фрагменты поверхности ПЛС-образца сплава Ti – 6Al – 4V с различным состоянием поверхности: без обработки (а, б); виброгалтовочная обработка (в, г); токарная обработка (д, е); гидроабразивная обработка (ж, з)

Fig. 1. Various fragments of the surface of Ti – 6Al – 4V SLM samples at different surface conditions: untreated (a, b); vibro-grinding treatment (c, d); turning (e, f); waterjet treatment (g, h)

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 1 приведены изображение 3D-модели образца для усталостных испытаний, а также изображения фрагментов рабочей части образца после различных типов постобработки поверх-

ности. Видно, что на поверхности образцов в исходном состоянии присутствуют спеченные частицы порошка (рис. 1, а, б), при виброгалтовочной обработке происходит деформация этих частиц (рис. 1, в, г), тогда как токарная и гидроабразивная постобработки удаляют с поверхности эти частицы (рис. 1, д – з).

Влияние постобработки на шероховатость, нанотвердость и количество циклов до разрушения (при амплитуде напряжений 337,5 МПа) ПЛС-образцов титанового сплава Ti – 6Al – 4V

Effect of the post-treatment of Ti – 6Al – 4V SLM samples on the roughness, nano-hardness and the number of cycles to failure (with stress amplitude 337.5 MPa)

Параметры	Без обработки	Виброгалтовочная обработка	Гидроабразивная обработка	Токарно-шлифовальная обработка
Шероховатость Ra , мкм	8 (± 2)	3,5 ($\pm 0,5$)	1,0 ($\pm 0,2$)	0,1 ($\pm 0,02$)
Нанотвердость, ГПа	5,1 ($\pm 0,1$)	—	6,1 ($\pm 0,1$)	5,0 ($\pm 0,1$)
Среднее число циклов до разрушения N	2100	2400	8400	7200

В таблице приведены результаты измерения шероховатости поверхности образцов ПЛС-образца сплава Ti – 6Al – 4V, после различных видов обработки. ПЛС-образцы без обработки имеют максимальную $Ra \approx 8$ мкм, токарно-шлифовальная обработка обеспечивает минимальную $Ra \approx 0,1$ мкм.

Здесь же представлены результаты малоцикловых усталостных испытаний ПЛС-образцов при нагрузке 750 МПа после различных видов обработки поверхности рабочей части. Наблюдается существенное увеличение среднего числа циклов до разрушения при уменьшении шероховатости поверхности для всех видов обработки, за исключением токарно-шлифовальной. Показано, что использование гидроабразивной обработки, после которой $Ra = 1$ мкм, позволяет увеличить количество циклов до разрушения в четыре раза по сравнению с исходным состоянием после ПЛС. Виброгалтовочная обработка не оказывает существенного влияния на усталостные характеристики образцов по сравнению с исходным состоянием после ПЛС.

Фрактографический анализ показывает, что на всех исследуемых образцах можно выделить классические зоны разрушения, а именно — зону зарождения микротрещины, зону медленного роста трещины, зону ускоренного роста трещины и зону долома (рис. 2). Видно, что во всех случаях очаги разрушения расположены на поверхности образцов. В исходном состоянии и после токарной обработки наблюдается многоочаговое разрушение. В зонах зарождения и медленного роста микротрещин можно наблюдать типичные усталостные бороздки, расположенные перпендикулярно направлению роста микротрещины. Расстояние между бороздками составляет около 1 мкм (см. рис. 2, з). Зона медленного роста трещины характеризуется малой степенью шероховатости излома и занимает не более 5 % от общей площади излома, тогда как зона ускоренного распространения трещины с более выраженным рельефом и зона долома составляют около 75 и 20 % от общей площади излома соответственно. Подобный вид разрушения, наблюдаемый в условиях малоциклового усталости, характерен для

одноосного растяжения — сжатия. Из рис. 2 видно, что зоны усталостного разрушения имеют идентичный вид для всех видов обработки поверхности, что может свидетельствовать об идентичных механизмах разрушения. Таким образом, существенное отличие в количестве циклов до разрушения может быть связано только с первой стадией усталостного разрушения — зарождением трещины.

Обсуждение результатов

В таблице приведены результаты исследования влияния качества подготовки поверхности на среднее число циклов до разрушения усталостных ПЛС-образцов Ti – 6Al – 4V. Из нее видно, что виброгалтовочная обработка практически не влияет на усталостные характеристики, несмотря на уменьшение шероховатости Ra от 8 до 3,5 мкм, что может быть связано с сохранением после обработки поверхностных дефектов, являющихся концентраторами при усталостном разрушении. При этом характерный размер этих дефектов, вероятно, соизмерим с размером дефектов в состоянии после ПЛС без обработки. Гидроабразивная обработка обеспечивает шероховатость поверхности около 1 мкм, что является оптимальным показателем для медицинских имплантов, оптимальными показателями шероховатости для которых считаются значения 2 – 4 мкм [17]. Относительно высокое значение усталостной долговечности образцов после гидроабразивной обработки может быть связано с высокопрочным состоянием поверхности.

Исследование радиального распределения нанотвердости (глубина индентирования составляла 200 нм) образцов в исходном состоянии (после ПЛС), после токарной и гидроабразивной обработок показало, что на расстоянии от 5 до 40 мкм от поверхности ее значения для всех образцов остаются постоянными в интервале 4,5 – 5 ГПа (рис. 3). При этом в ПЛС-образцах после гидроабразивной обработки в приповерхностных слоях на глубине, не превышающей 5 мкм, нанотвердость увеличивается на 20 % (от 5 до 6 ГПа).

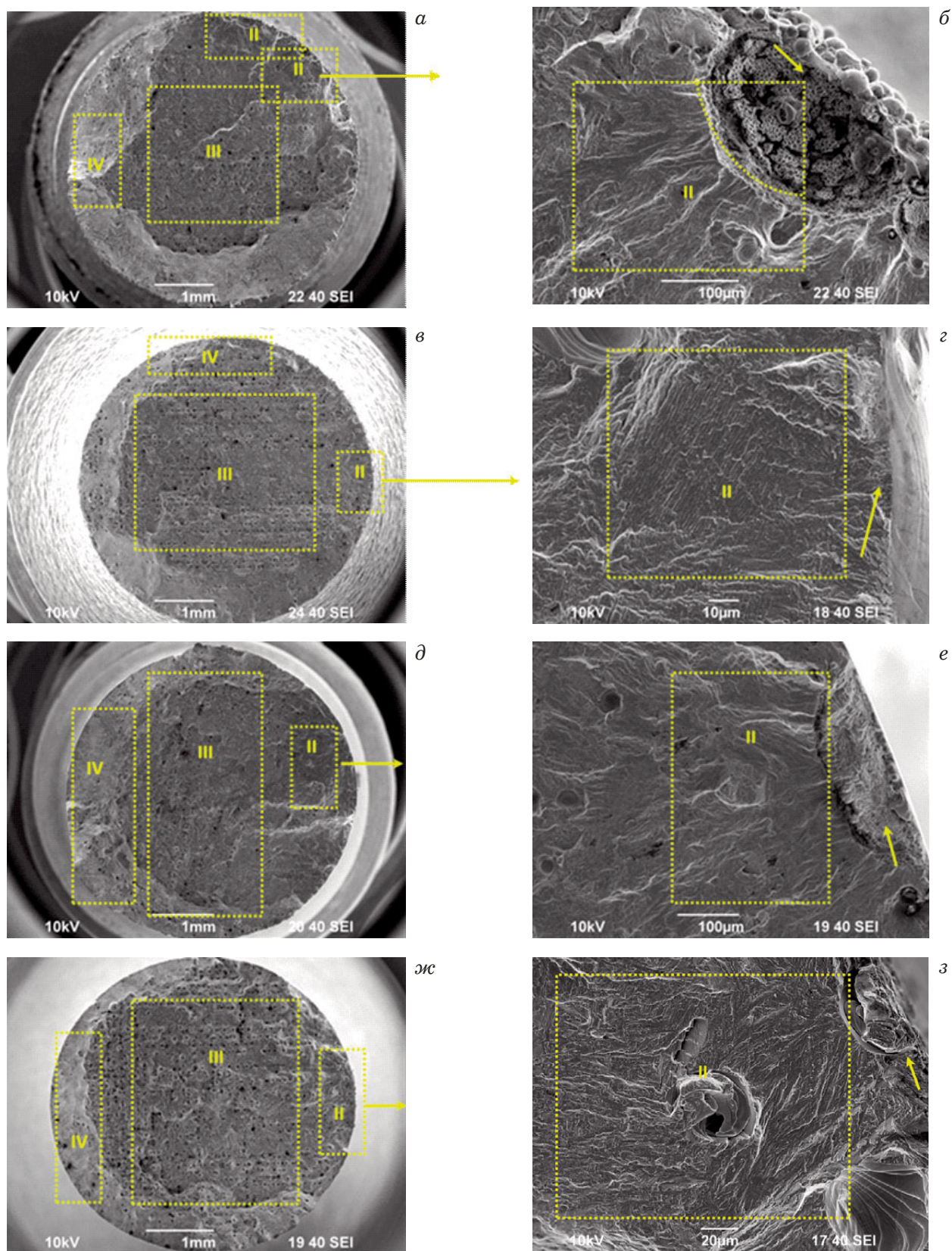


Рис. 2. Типичные изображения изломов ПЛС-образцов Ti – 6Al – 4V без обработки (*a, б*) и после различных видов обработки поверхности: виброгалтовочной (*в, з*); токарной (*д, е*); гидроабразивной (*ж, з*); римскими цифрами обозначены различные зоны разрушения: зарождения микротрещины (I), медленного роста трещины (II), быстрого роста трещины (III) и долома (IV)

Fig. 2. Typical images of fractures of Ti – 6Al – 4V SLM samples without treatment (*a, b*) and after various modes of the surface treatment: vibro-grinding treatment (*c, d*); turning (*e, f*); waterjet treatment (*g, h*). Roman numerals indicate various fracture zones: the microcrack nucleation zone (I), the slow crack growth zone (II), the rapid crack growth zone (III), and zone of final fracture (IV)

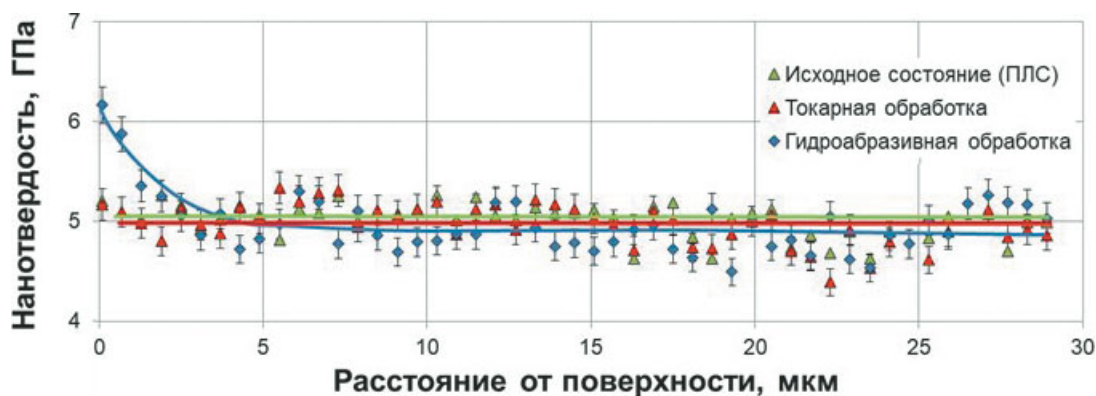


Рис. 3. Радиальное распределение нанотвердости ПЛС-образцов Ti – 6Al – 4V, после различных видов обработки поверхности

Fig. 3. Radial distribution of the nano-hardness of Ti – 6Al – 4V SLM samples after various types of surface treatment

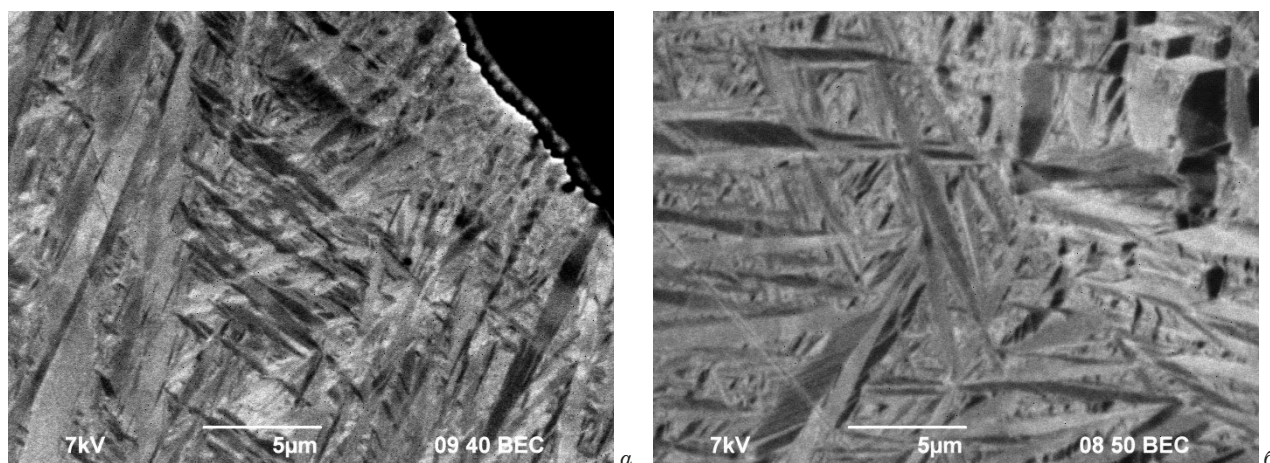


Рис. 4. Микроструктура ПЛС-образцов Ti – 6Al – 4V, после гидроабразивной обработки: *a* — приповерхностная область образца; *b* — центральная часть поперечного сечения образца

Fig. 4. Microstructure of Ti – 6Al – 4V, SLM samples after waterjet treatment: *a* — near surface area of the sample; *b* — central part of the sample cross-section

Необходимо отметить, что эффект упрочнения приповерхностного слоя после гидроабразивной обработки описан и в других работах, связанных с исследованием сплава Ti – 6Al – 4V, [20 – 25]. Большинство исследователей связывают увеличение прочности с подавлением роста трещин, обусловленного, во-первых, возникновением остаточных сжимающих напряжений [21 – 24] и, во-вторых, изменением структуры приповерхностного слоя, в том числе уменьшением размера зерна и увеличением плотности дислокаций [21, 22, 26]. Известно, что высокая скорость кристаллизации во время процесса лазерного сплавления ($10^5 - 10^7$ К/с [27, 28]) титанового сплава Ti – 6Al – 4V, приводит к формированию игольчатой мартенситной структуры. После гидроабразивной обработки структура в приповерхностном слое (рис. 4, *a*) измельчается, что способствует повышению нанотвердости. Такая структура тормозит процесс зарождения и распростра-

нения микротрещин. Обычно предполагается, что основным фактором, определяющим усталостную прочность, является уровень шероховатости. Принято считать, что более гладкая поверхность с низким уровнем шероховатости обеспечивает более высокие усталостные свойства [29, 30]. Однако в некоторых работах авторы отмечают, что повышение качества поверхности не оказывает влияния на усталостные свойства [9, 31, 32]. Полученные в данной работе результаты также подтверждают, что в случае ПЛС-материалов прямая корреляция между качеством поверхности и показателями усталостных характеристик наблюдается не всегда. Для повышения усталостных характеристик необходимо обеспечить не только гладкость поверхности, но и формирование на поверхности упрочняющего слоя на глубину порядка размера зародышевой усталостной трещины в материале. В случае Ti – 6Al – 4V, при нагрузках ~ 750 МПа эта величина

составляет ~5 мкм. Упрочнение на такую глубину одновременно с понижением шероховатости до ~1 мкм может быть обеспечено путем использования гидроабразивной обработки.

Заключение

В работе приведены результаты исследований влияния качества поверхности образцов титанового сплава Ti – 6Al – 4V, полученных с использованием послойного лазерного сплавления, на усталостные характеристики. Показано, что гидроабразивная обработка поверхности ПЛС-образцов позволяет обеспечить шероховатость $Ra \approx 1$ мкм с одновременным упрочнением поверхностного слоя на глубину около 5 мкм, что приводит к четырехкратному росту числа циклов до разрушения. Это открывает широкие перспективы использования гидроабразивной обработки поверхностей ПЛС-изделий. Необходимо отметить также, что данный вид постобработки в отличие от альтернативных методов (точение, шлифование, галтование и т.д.) позволяет обрабатывать сложные поверхности, включая внутренние функциональные каналы изделий, что может быть использовано для постобработки эндопротезов со сложной внутренней геометрией.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 22-19-00271.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- Liu S., Shin Y. C. Additive manufacturing of Ti – 6Al – 4V alloy: A review / *Mater. Des.* 2019. Vol. 164. P. 107552. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.107552
- Tshephe T. S., Akinwamide S. O., Olevsky E., Olubambi P. A. Additive manufacturing of titanium-based alloys. A review of methods, properties, challenges, and prospects / *Heliyon*. 2022. Vol. 8. P. 09041. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09041
- Cerri E., Ghio E., Bolelli G. Ti – 6Al – 4V-ELI Alloy Manufactured via Laser Powder-Bed Fusion and Heat-Treated below and above the β -Transus: Effects of Sample Thickness and Sandblasting Post-Process / *Appl. Sci.* 2022. Vol. 12. P. 5359. DOI: 10.3390/app12115359
- Vyacheslavov A. V., Malinkina Yu. Yu., Bichaev V. B., et al. Analysis of corrosion-resistant titanium alloys doped with ruthenium by ICP-AES / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2018. Vol. 84. N 5. P. 14 – 19 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-5-14-19
- Kalienko M. S., Volkov A. V., Zhelnina A. V. Estimation of oxygen ingress depth in titanium alloys after elevator temperature exposure / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2018. Vol. 84. N 3. P. 32 – 35 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-32-35
- Veiga C., Davim J. P., Loureiro A. J. R. Review on machinability of titanium alloys: the process perspective / *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2013. Vol. 34. P. 148 – 164.
- Kolachev B. A. (ed.). Semi-finished products made of titanium alloys. — Moscow: ONTI VILS, 1996. — 581 p. [in Russian].
- Koju N., Niraula S., Fotovvati B. Additively Manufactured Porous Ti – 6Al – 4V, for Bone Implants: A Review / *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 687. DOI: 10.3390/met12040687
- Bambach M., Sizova I., Szyndler J., et al. On the hot deformation behavior of Ti – 6Al – 4V, made by additive manufacturing / *J. Mater. Process. Technol.* 2021. Vol. 288. P. 116840. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116840
- Shorstov S. Yu., Marakhovsky P. S., Pakhomkin S. I., Razmakhov M. G. Study of the thermophysical properties of heat-resistant intermetallic titanium γ -alloy obtained using methods of shaped casting and additive technologies / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2022. Vol. 88. N 9. P. 28 – 34 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-9-28-34
- Kelly C. N., Evans N. T., Irvin C. W., et al. The effect of surface topography and porosity on the tensile fatigue of 3D printed Ti – 6Al – 4V, fabricated by selective laser melting / *Mater. Sci. Eng. C*. 2019. Vol. 98. P. 726 – 736. DOI: 10.1016/j.msec.2019.01.024
- Depboylu F. N., Yasa E., Poyraz O., et al. Titanium based bone implants production using laser powder bed fusion technology / *J. Mater. Res. Technol.* 2022. Vol. 17. P. 1408 – 1426. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.01.087
- Guo A. X. Y., Cheng L., Zhan S., et al. Biomedical applications of the powder-based 3D printed titanium alloys: A review / *J. Mater. Sci. Technol.* 2022. Vol. 125. P. 252 – 264. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.11.084
- Hoque M. E., Showva N.-N., Ahmed M., et al. Titanium and titanium alloys in dentistry: current trends, recent developments, and future prospects / *Heliyon*. 2022. Vol. 8. P. e11300. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11300
- Aufa A. N., Hassan M. Z., Ismail Z. Recent advances in Ti – 6Al – 4V, additively manufactured by selective laser melting for biomedical implants: Prospect development / *J. Alloys Compd.* 2022. Vol. 896. P. 163072. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.163072
- Kim K.-H., Ramaswamy N. Electrochemical surface modification of titanium in dentistry / *Dent. Mater. J.* 2009. Vol. 28. P. 20 – 36. DOI: 10.4012/dmj.28.20
- Schwartz Z., Raz P., Zhao G., et al. Effect of micrometer-scale roughness of the surface of Ti – 6Al – 4V, pedicle screws in vitro and in vivo / *J. Bone Joint Surg. Am.* 2008. Vol. 90. P. 2485 – 2498. DOI: 10.2106/jbjs.g.00499
- de Wild M., Schumacher R., Mayer K., et al. Bone regeneration by the osteoconductivity of porous titanium implants manufactured by selective laser melting: a histological and micro computed tomography study in the rabbit / *Tissue Eng. Part A*. 2013. Vol. 19. P. 2645 – 2654. DOI: 10.1089/ten.tea.2012.0753
- Zhao G., Raines A. L., Wieland M., et al. Requirement for both micron- and submicron scale structure for synergistic responses of osteoblasts to substrate surface energy and topography / *Biomaterials*. 2007. Vol. 28. P. 2821 – 2829. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2007.02.024
- Chillman A., Ramulu M., Hashish M. Waterjet Peening and Surface Preparation at 600 MPa: A Preliminary Experimental Study / *J. Fluids Eng.* 2007. Vol. 129. N 4. P. 485 – 490. DOI: 10.1115/1.2436580
- Song F., Yao S., Liu L., et al. Submerged deflecting abrasive waterjet peening for improving the surface integrity and solid particle erosion resistance of Ti – 6Al – 4V, alloy / *Surf. Coat. Technol.* 2023. Vol. 470. P. 129780. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129780
- Yao S.-L., Wang G.-Y., Yu H., et al. Influence of submerged micro-abrasive waterjet peening on surface integrity and fatigue performance of TA19 titanium alloy / *Int. J. Fatigue*. 2022. Vol. 164. P. 107076. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107076
- Huang L., Kinnell P., Shipway P. H. Removal of heat-formed coating from a titanium alloy using highpressure waterjet: Influence of machining parameters on surface texture and residual stress / *J. Mater. Process Technol.* 2015. Vol. 223. P. 129 – 138. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.03.053
- Arola D., Alade A. E., Weber W. Improving fatigue strength of metals using abrasive waterjet peening / *Mach. Sci. Technol.*

- an Int. J. 2006. Vol. 10. N 2. P 197 – 218.
DOI: 10.1080/10910340600710105
25. **Lieblich M., Barriuso S., Ibáñez J.** On the fatigue behavior of medical Ti – 6Al – 4V, roughened by grit blasting and abrasiveless waterjet peening *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2016. Vol. 63. P. 390 – 398. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.07.011
 26. **Ramakrishnan S., Singaravelu D. L., Senthikumarin V.** Microstructure and Chemical State Analysis of Ti – 6Al – 4V Alloy During Abrasive Water Jet Machining Process / *Recent Advances in Materials Technologies. Select Proc. of ICEMT 2021*, K. Rajkumar, E. Jayamani, P. Ramkumar, Eds. 2022. — Springer Nature Singapore Pte Ltd., P. 607 – 617.
 27. **Nguyen H. D., Pramanik A., Basak A. K., et al.** A critical review on additive manufacturing of Ti – 6Al – 4V alloy: microstructure and mechanical properties / *J. Mater. Res. Technol.* 2022. Vol. 18. P. 4641 – 4661. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.055
 28. **Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C.** Additive manufacturing of metals / *Acta Mater.* 2016. Vol. 117. P. 371. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019
 29. **Karakas Ö., Kardes F. B., Foti P., et al.** An overview of factors affecting high-cycle fatigue of additive manufacturing metals / *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2023. Vol. 46. P. 1649 – 1668. DOI: 10.1111/ffe.13967
 30. **Fatemi A., Molaei R., Simsiriwong J., et al.** Fatigue behaviour of additive manufactured materials: An overview of some recent experimental studies on Ti – 6Al – 4V, considering various processing and loading direction effects / *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2019. Vol. 42. P. 991 – 1009. DOI: 10.1111/ffe.13000
 31. **Jamshidi P., Aristizabal M., Kong W., et al.** Selective Laser Melting of Ti – 6Al – 4V: The Impact of Post-processing on the Tensile, Fatigue and Biological Properties for Medical Implant Applications / *Materials.* 2020. Vol. 13. P. 2813. DOI: 10.3390/ma13122813
 32. **Li Y.-H., Wang B., Ma C.-P., et al.** Material Characterization, Thermal Analysis, and Mechanical Performance of a Laser-Polished Ti Alloy Prepared by Selective Laser Melting / *Metals.* 2019. Vol. 9. P. 112. DOI: 10.3390/met9020112