

**Андрей Викторович Корелин<sup>1\*</sup>, Антон Владимирович Сергеев<sup>1</sup>, Игорь Алексеевич Воронцов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Уральский Федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

\**a.v.korelin@urfu.ru*

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ВТ6 ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Проведено исследование влияния различных методов поверхностной обработки на усталостную прочность аддитивно изготовленных образцов из сплава ВТ6. По результатам испытаний по схеме одноосевого растяжения-сжатия установлено, что поверхностная пластическая деформация приводит к повышению усталостной прочности. Доказано, что оптимальным методом поверхностной обработки является наноструктурирующее выглаживание.

*Ключевые слова:* усталостные свойства; Ti6Al4V; аддитивные технологии. наноструктурирующее выглаживание; поверхностный слой.

***Andrey V. Korelin, Anton V. Sergeev, Igor A. Vorontsov***

## INFLUENCE OF SURFACE TREATMENT ON FATIGUE PROPERTIES OF Ti64 ALLOY PRODUCED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

The influence of various methods of surface treatment on fatigue strength of additively manufactured specimens from VT6 alloy has been investigated. According to the results of tests on the scheme of uniaxial tension-compression, it is established that surface plastic deformation leads to an increase in fatigue strength. It is proved that the optimal method of surface treatment is nanostructured burnishing.

*Keywords:* fatigue properties; Ti6Al4V; additive technologies; nanostructural burnishing; surface layer.

### Ведение

Сплав Ti6Al4V, также известный как ВТ6, относится к  $\alpha + \beta$  титановым сплавом с высокими прочностными свойствами, коррозионной стойкостью и биосовместимостью [1]. Современным методом производства изделий из данного сплава являются аддитивные технологии. Данный метод позволяет изготавливать близкие к чистовому варианту продукты с меньшим числом отходов производства по сравнению с традиционными методами [2]. Однако, низкое качество поверхности деталей, произведенных методом селективного лазерного плавления, приводит к снижению усталостных долговечности [3].

Высокий уровень шероховатости негативно влияет на механические свойства, в особенности на усталостные свойства. Развитый микрорельеф служит концентратором напряжений и способствует зарождению трещин [4].

Повысить качество поверхности возможно при помощи различных методов поверхностной обработки, таких как галтовка и дробеструйная обработка. Перспективным методом поверхностной обработки является наноструктурирующее выглаживание. В статье В.П. Кузнецова и др. [5] представлены результаты экспериментальных исследований стали AISI 304, установлено, что после точения и наноструктурирующего выглаживания параметр шероховатости поверхности Ra составляет порядка 380 нм, что соответствует 12 классу чистоты.

Целью работы является изучение влияния различных методов обработки поверхности на усталостные свойства сплава ВТ6, полученного методом прямого лазерного спекания.

#### Материалы и методы исследования

Материалом исследования является сплав ВТ6, полученный методом прямого лазерного спекания на 3D принтере DMP Flex 350 из порошка марки ПТН-8.ВТ6 фракцией 15-45 мкм. Химический состав приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав ПТН-8.ВТ6, мас. %

Ti	Al	V	Fe	O	H	N	C	Прочее
Основа	5,9	4,2	0,11	0,16	0,007	0,030	0,017	До 0,3

Снятие напряжений после спекания проведено с помощью термической обработки образцов при температуре 850 °С в вакууме.

В качестве обработок поверхности были выбраны дробеструйная обработка, галтовка и наноструктурное выглаживание.

Дробеструйная обработка осуществлялась стеклянными шариками размером 40-80 мкм при давлении  $6 \times 10^5$  Па. Наноструктурирующее выглаживание (НВ) проводилось инструментом со сферическим индентором из ПСТМ DBN радиусом R=2 мм при силе выглаживания  $F_b=300$  Н, скорости скольжения  $v_s=20$  м/мин и количестве рабочих проходов  $n_p=3$  с подачей 0,04 мм/об. Для проведения галтовки был выбран сухой метод, абразивный материал приводился в движение роторным способом, время галтовки составило 8 часов.

Испытания на усталость проводили на высокочастотной магнитно-резонансной машине Rumul Testronic 20 кН по схеме одноосевого растяжения-сжатия на образцах размеры и форма, которых представлена на рисунке 1.



Рис. 1. — Образец для проведения усталостных испытаний: а – чертеж, б – снимок

В ходе испытаний фиксировались следующие параметры: максимальное и минимальное усилие цикла, частота нагружения, количество циклов нагружения. Силовые параметры нагружения регистрировались встроенными датчиками испытательной машины. База испытаний была установлена значением  $N = 1 \times 10^7$ .

#### Результаты исследования и их обсуждение

По результатам проведенных усталостных испытаний построена диаграмма зависимости количества циклов до разрушения при определенной нагрузке. (рис. 2). По представленным на диаграмме данным видно, что образцы после дробеструйной обработки поверхности достигли базы испытаний при нагрузке  $\sigma = 213$  МПа. Образцы после наноструктурирующего выглаживания разрушение произошло при нагрузке  $\sigma = 340$  МПа по достижению порядка  $2 \times 10^6$  циклов. При одинаковой нагрузке образцы после НВ выдерживают большее число циклов, в сравнении с образцами после обработки дробью. Это связано с тем, что при наноструктурирующем выглаживании модифицированный слой глубже по сравнению с дробеструйной обработкой, а также при данном методе повышается степень чистоты поверхности. Относительно исходного состояния и всех рассматриваемых методов, галтовка продемонстрировала наименьший пророст усталостной долговечности.

Выявлено, что после проведения поверхностной пластической деформации усталостная выносливость образцов возрастает. Оптимальным из рассматриваемых методов поверхностной обработки является наноструктурирующее выглаживание.

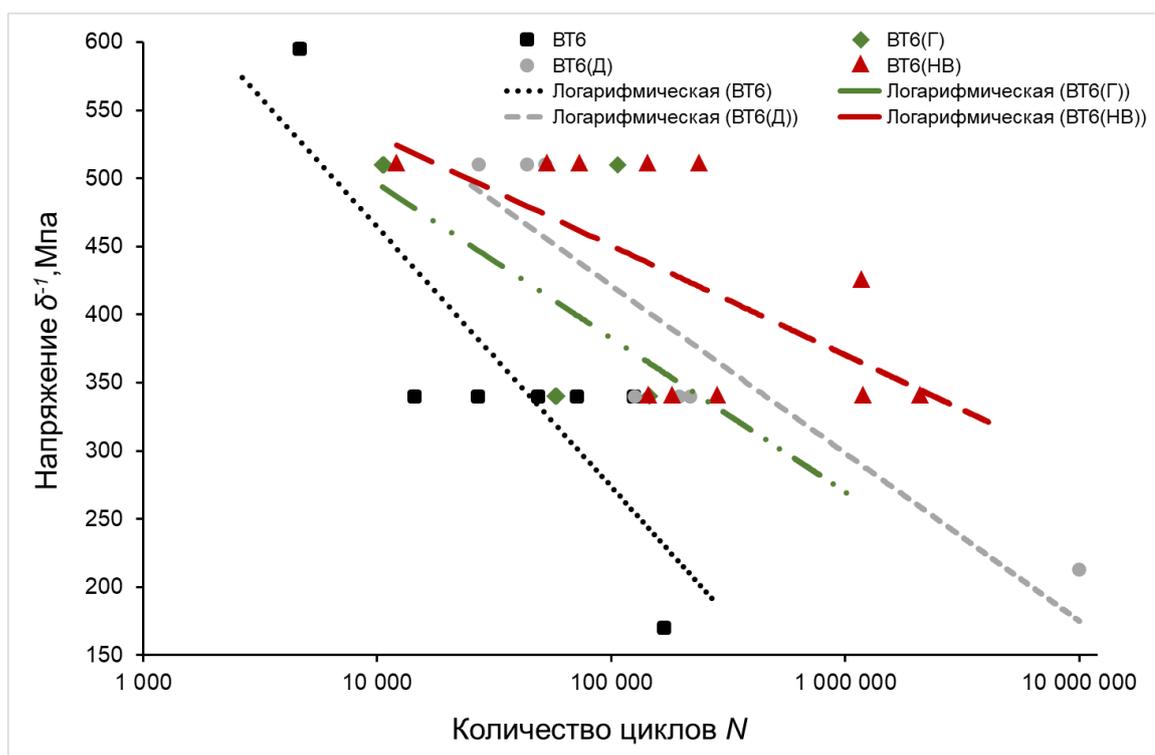


Рис. 2. Диаграмма зависимости количества циклов до разрушения при определенной нагрузке.

Работа выполнена в рамках соглашения с Министерством науки и высшего образования РФ 075-03-2024-009/4 от 11.04.2024 (код шифр FEUZ-2024-0020).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. M.J. Donachie Titanium: A Technical Guide (second ed.), ASM International, Materials Park, OH (2000)
2. R.R. Boyer An overview on the use of titanium in the aerospace industry Mater. Sci. Eng. A, 213 (1) (1996), pp. 103-114
3. E. Wycisk, A. Solbach, S. Siddique, D. Herzog, F. Walther, C. Emmelmann Effects of defects in laser additive manufactured Ti-6Al-4V on fatigue properties. Phys. Procedia, 56 (2014), pp. 371-378
4. Монография Научные основы повышения малоциклового прочностии / Н.А. Махутов, К.В. Фролов, М.М. Гаденин и др.; под ред. Н.А. Махутова; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, 2006. – 623 с.
5. Kuznetsov V.P., Kosareva A.V. Increase of Wear Heat Resistance of the AISI 304 Steel Surface Layer by Multi-Pass Nanostructuring Burnishing // Journal of Materials and Engineering. 2023. V. 01. Iss. 2. pp. 55-61.