

*Л.В. Проходцева<sup>1</sup>, В.С. Ерасов<sup>1</sup>, О.Ю. Лаврова<sup>1</sup>, А.В. Лавров<sup>1</sup>*

## **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЦИКЛА НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА И МИКРОСТРОЕНИЕ ИЗЛОМОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТЗ-1**

*Исследовано влияние формы цикла нагружения на скорость роста усталостной трещины и характер изломов материала диска компрессора, разрушившегося в процессе эксплуатации. Установлено, что при трапецеидальной форме цикла нагружения скорость роста трещины выше, а строение излома в большей степени соответствует эксплуатационному излому, чем при синусоидальной форме цикла.*

**Ключевые слова:** *диски компрессора, титановые сплавы, циклическое нагружение, излом, скорость роста усталостной трещины, шаг усталостных бороздок.*

*L.V. Prohodtseva<sup>1</sup>, V.S. Erasov<sup>1</sup>, O.Yu. Lavrova<sup>1</sup>, A.V. Lavrov<sup>1</sup>*

## **CYCLE FORM EFFECT UPON THE FATIGUE PROPERTIES AND VT3-1 TITANIUM ALLOY FRACTURE MICROSTRUCTURES**

*The effect of loading cycle form upon the fatigue crack propagation rate was studied along with the material fracture character of compressor disk, being destructed during the service process. It was stated, the crack propagation rate is higher at the trapezoidal form of the loading cycle, but the fracture structure, to a greater degree, was in line with the service fracture, opposite to the cycle sinusoidal form.*

**Keywords:** *compressor disks, titanium alloys, cyclic loading, fracture, fatigue crack propagation rate, fatigue streak spacing.*

---

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

В эксплуатации неоднократно имели место случаи преждевременного разрушения дисков компрессора из титановых сплавов в результате усталости, при этом не было обнаружено отклонений от требований технической документации по химическому составу, макро- и микростроютуре.

Режим работы дисков компрессора представляет собой циклическое нагружение в малоцикловоу области с выдержкой при максимальной нагрузке (трапецеидальный цикл).

На основе проведенных различными авторами исследований поведения титановых сплавов в условиях циклического нагружения [1–4] отмечается их повышенная чувствительность к форме, асимметрии цикла, частоте нагружения. Явление чувствительности псевдо- $\alpha$ - и  $(\alpha+\beta)$ -титановых сплавов к форме цикла нагружения рассматривается в течение последних 30-ти лет [5–6], и, несмотря на это, оно до сих пор представляет интерес для конструкторов и организаций, эксплуатирующих двигатели.

На одном из разрушенных дисков из сплава ВТЗ-1 было проведено исследование влияния формы цикла усталостного нагружения на характеристики циклической трещиностойкости и микростроение изломов разрушенных образцов.

В исследованном диске микростроютура глобулярного типа чередуется с участками вытянутой  $\alpha$ -фазы, на отдельных участках виден мелкодисперсный распад  $\beta$ -фазы. Данная микростроютура соответствует следующим типам шкалы микростроютур: 1а, 1б,

За (ОСТ1 90197) и является типичной для существующей технологии на предприятии-изготовителе дисков компрессора.

Образцы для испытания на внецентренное растяжение вырезали из обода диска таким образом, чтобы плоскость предполагаемого разрушения была параллельна плоскости разрушения диска, а направление разрушения совпадало с направлением развития трещины в эксплуатации.

Испытания на СРТУ проводили на сервогидравлической испытательной машине MTS-810 с максимальной предельной нагрузкой 50 кН при комнатной температуре. Измерение длины трещины в процессе испытаний осуществляли визуально. Образцы испытывали при циклическом нагружении по синусоидальной форме цикла с частотой 0,3 Гц и с трапецеидальной формой цикла с выдержкой 1 мин при максимальной нагрузке и  $\sim 1$  с при минимальной нагрузке цикла. Продолжительность изменения нагрузки от минимальной до максимальной и от максимальной до минимальной для трапецеидального цикла составляла по 0,5 с. Коэффициент асимметрии цикла напряжений  $R_\sigma$  в обоих случаях равнялся 0,1.

На рис. 1 приведены диаграммы циклической трещиностойкости, полученные по результатам испытаний образцов при синусоидальном и трапецеидальном циклическом нагружении. Скорость роста трещины при испытании с выдержкой 1 мин при максимальной нагрузке цикла от 2 до 10 раз (в зависимости от величины  $\Delta K$ ) превышает соответствующие значения СРТУ при нагружении по синусоидальному закону с частотой 0,3 Гц.

Сопоставление результатов, полученных при испытании исследуемого диска на СРТУ по синусоидальному циклу с данными СРТУ других аналогичных дисков из сплава ВТ3-1 как в исходном состоянии, так и после наработки в эксплуатации, показало, что зависимость СРТУ от  $\Delta K$  у исследуемого диска лежит несколько выше, чем у других дисков независимо от их наработки в эксплуатации (рис. 2).

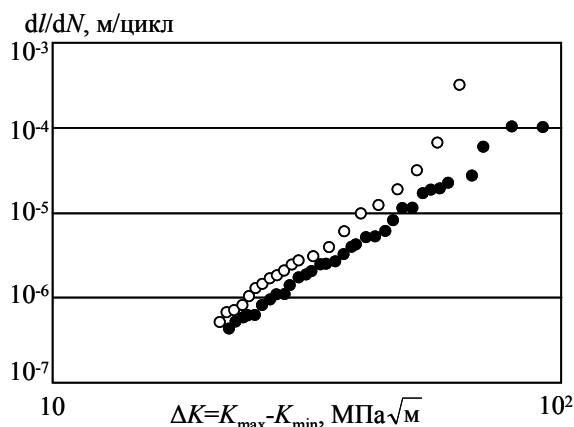


Рис. 1. Диаграммы циклической трещиностойкости материала диска, полученные при синусоидальном (●) и трапецеидальном (○) циклах нагружения

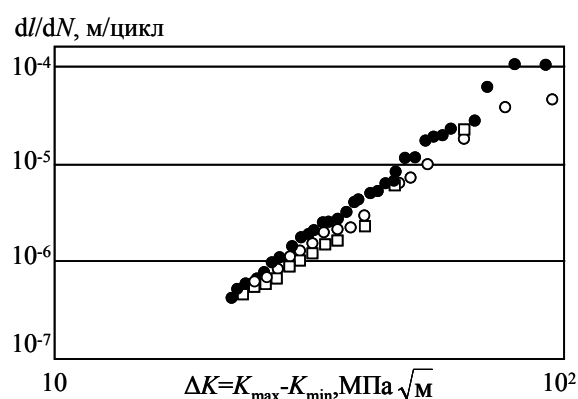


Рис. 2. Диаграммы циклической трещиностойкости дисков из сплава ВТ3-1 без наработки (○) и с наработкой 5580 (□) и 9083 цикл (● – исследуемый диск)

Исследование макростроения изломов образцов, испытанных при трапецеидальном циклическом нагружении, показало, что после испытания с выдержкой 1 мин при максимальной нагрузке цикла излом отличается большей шероховатостью, более резко выраженной слоистостью, чем после испытания в синусоидальном режиме, и приближается к макростроению излома диска, разрушившегося в эксплуатации (рис. 3).

Исследование микростроения изломов испытанных образцов проводили на растровых электронных микроскопах JSM 840 и JSM 6490 LV.

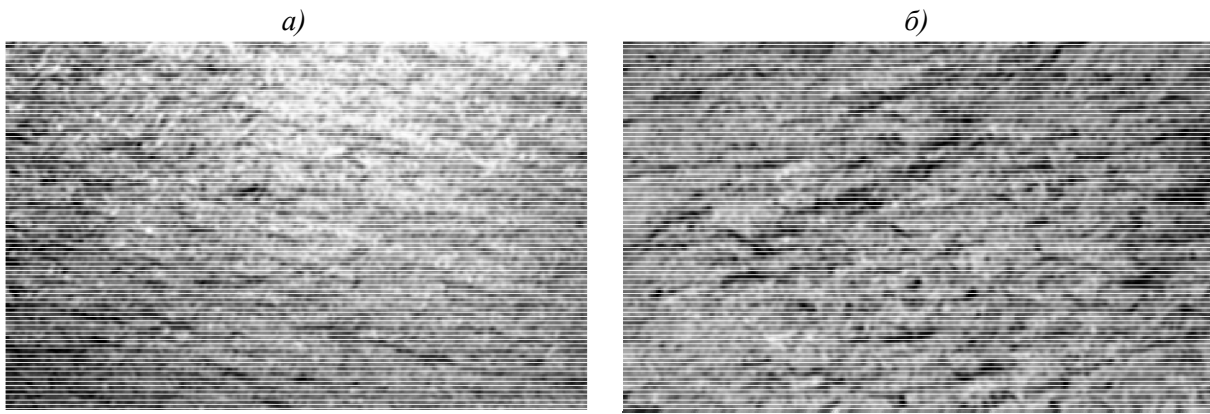


Рис. 3. Макростроение ( $\times 4$ ) изломов образцов после усталостных испытаний при синусоидальном (а) и трапецидальном (б) циклическом нагружении

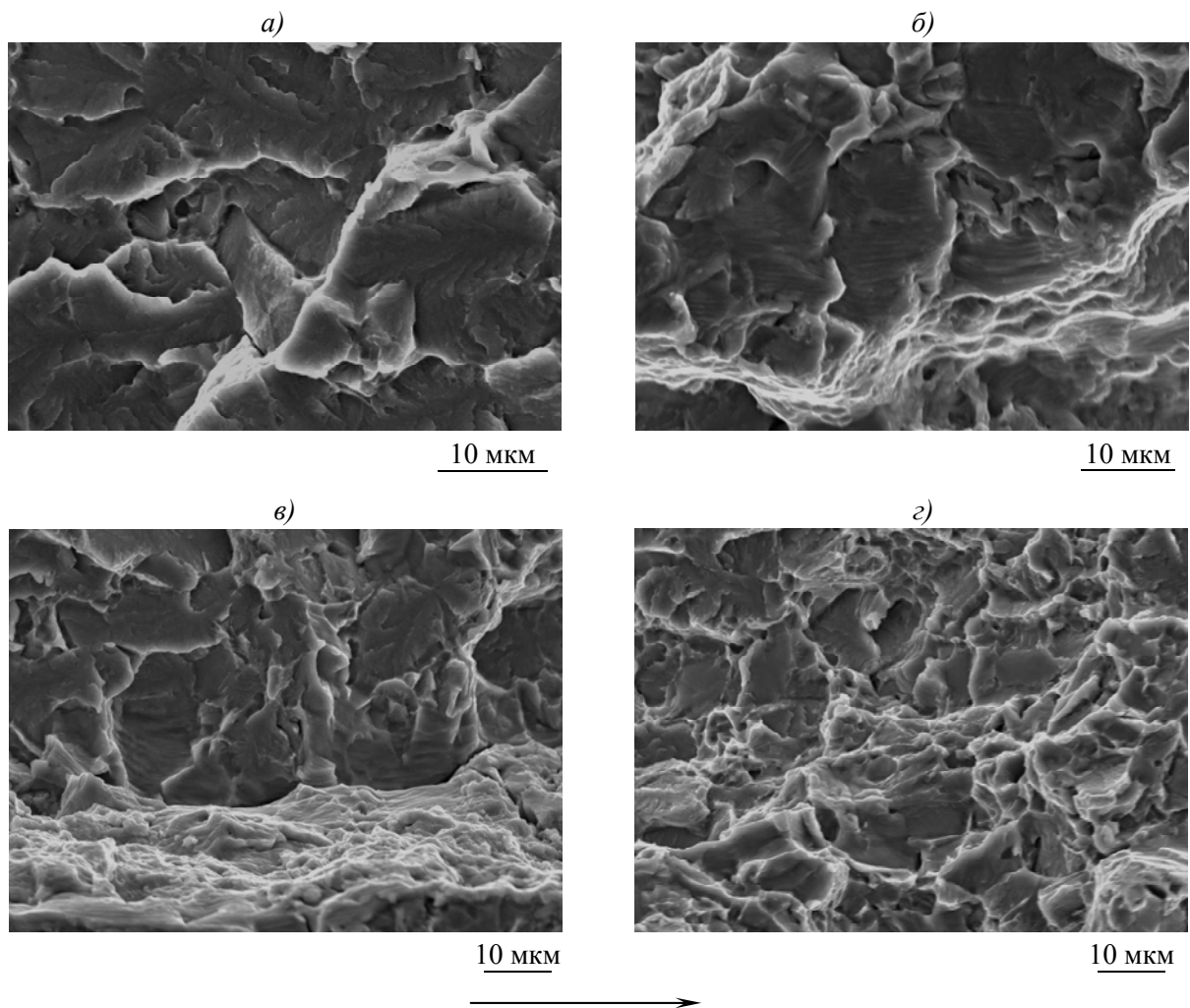


Рис. 4. Микростроение изломов образцов, испытанных при трапецидальном циклическом нагружении при  $\Delta K$ : 21,3 (а), 22,7 (б), 26,2 (в) и 90,6 МПа $\sqrt{м}$  (г) (стрелкой показано направление макроразрушения образца)

Исследование показало, что в изломах образцов, испытанных при трапецидальном нагружении (рис. 4), меньше участков, занятых усталостными бороздками, и больше доля излома, занятая циклическими квазисколами и ямочным рельефом, чем в изломах

образцов после синусоидального нагружения (рис. 5). Первоначально разрушение происходит с образованием фасеток циклических квазисколов по первичной  $\alpha$ -фазе, вытянутой в направлении деформации, с последующим соединением фасеток с образованием усталостных бороздок или ямочного рельефа. Форма фасеток квазисколов зависит от формы и размеров частиц первичной  $\alpha$ -фазы. Измерение шага усталостных бороздок по длине изломов показало, что при испытании по синусоидальной форме цикла шаг усталостных бороздок соответствует макроскорости роста трещины в более широком диапазоне изменения размаха коэффициентов интенсивности напряжений ( $\Delta K$ ), чем при испытании с трапецеидальной формой цикла (рис. 6).

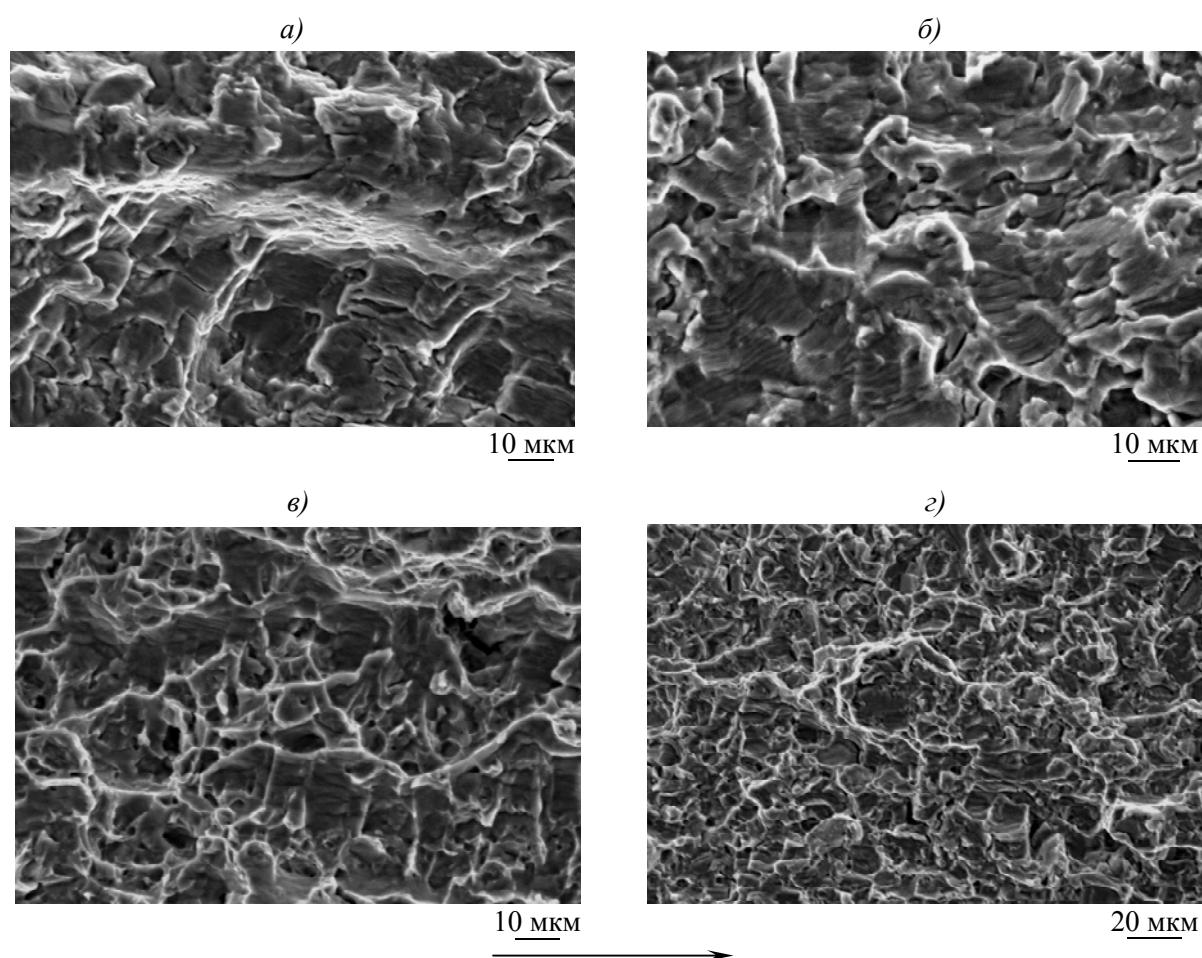


Рис. 5. Микростроение изломов образцов, испытанных при синусоидальном циклическом нагружении при  $\Delta K$ : 21,7 (а), 25,5 (б), 34,5 МПа $\sqrt{м}$  (в, г) (стрелкой показано направление макроразрушения образца)

Подсчет числа циклов по шагу усталостных бороздок в случае испытания при синусоидальном нагружении показал результаты, близкие к экспериментальным (7300 и 7800 циклов соответственно).

Таким образом, на основании проведенного исследования можно заключить, что материал диска чувствителен к условиям циклического нагружения: в условиях трапецеидального нагружения с выдержкой при максимальной нагрузке цикла в течение 1 мин скорость роста трещины выше (по сравнению с синусоидальным циклом) во всем исследованном интервале изменения  $\Delta K$ .

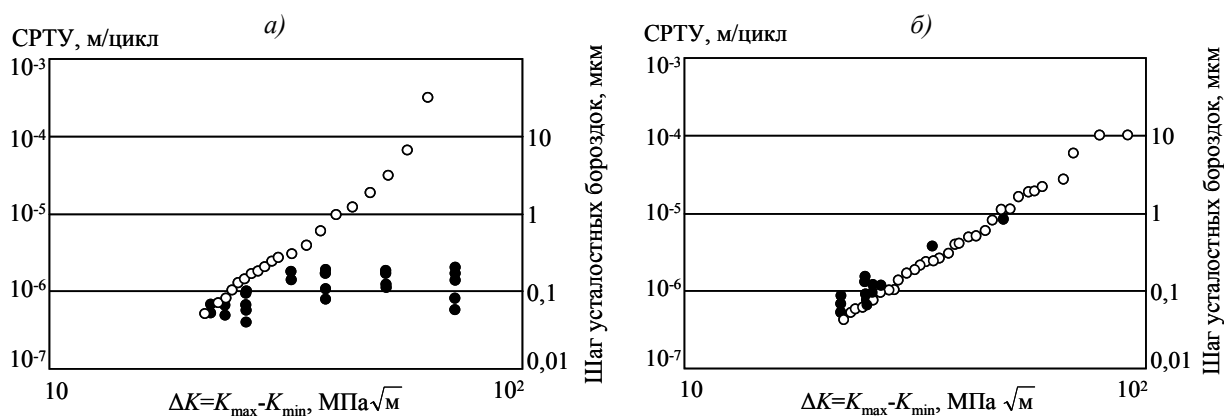


Рис. 6. Зависимости макро- и микроскорости роста трещины в образцах, испытанных на СРТУ (○) при трапецеидальном (а) и синусоидальном (б) циклическом нагружении (● – шаг усталостных бороздок)

При циклическом нагружении с трапецеидальной формой цикла скорость роста усталостной трещины, подсчитанная по шагу усталостных бороздок, совпадает с макроскоростью в более узком интервале значений  $\Delta K$ , чем при синусоидальной форме цикла нагружения.

Макро- и микростроение изломов при испытании с трапецеидальным нагружением ближе к строению изломов дисков, полученных при эксплуатации. Таким образом, циклические испытания с нагружением по трапецеидальному закону с выдержкой при максимальной нагрузке позволяют точнее оценивать надежность материала дисков по сравнению с испытаниями на СРТУ при синусоидальной форме цикла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздовский Б.А., Проходцева Л.В., Новосильцева Н.И. Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Metallurgia. 1983. С. 167–168.
2. Eylon W.I., Gostelow C.R. Effect of Hold Time on the Fatigue Properties of a  $\beta$ -Processed Titanium Alloy //Metall. Trans. 1979. V. A. №10A. P. 1837–1846.
3. Evans W.I. Dwell Sensitive Fatigue in a Near Alpha Titanium Alloy //J. Mat. Sci. Let. 1987. №6. P. 571–574.
4. Vache M.R. A review of dwell sensitive fatigue in titanium alloys: the role of microstructure, texture and operating conditions //Inter. J. of Fatigue. 2003. V. 20. P. 1–9.
5. Проходцева Л.В., Добрынина О.Ю. и др. Кинетика и фрактографические особенности разрушения дисков компрессора из сплава BT18Y: Сб. статей 2-й международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ им. А.А. Байкова. 2007. С. 301–303.
6. Кашапов О.С., Ночовная Н.А. и др. Особенности характера разрушения и структурно-фазового состояния нового жаропрочного титанового сплава //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 39–42.

#### REFERENCES LIST

1. Drozdovskij B.A., Prohodceva L.V., Novosil'ceva N.I. Treshhinostojkost' titanovyh splavov [Fracture toughness of titanium alloys]. M.: Metallurgija. 1983. S. 167–168.
2. Eylon W.I., Gostelow C.R. Effect of Hold Time on the Fatigue Properties of a  $\beta$ -Processed Titanium Alloy //Metall. Trans. 1979. V. A. №10A. P. 1837–1846.
3. Evans W.I. Dwell Sensitive Fatigue in a Near Alpha Titanium Alloy //J. Mat. Sci. Let. 1987. №6. P. 571–574.

4. Bache M.R. A review of dwell sensitive fatigue in titanium alloys: the role of microstructure, texture and operating conditions //Inter. J. of Fatigue. 2003. V. 20. P. 1–9.
5. Prohodceva L.V., Dobrynina O.Ju. i dr. Kinetika i fraktografskie osobnosti razrushenija diskov kompressora iz splava VT18U [Kinetics and fractographic features of the destruction of the compressor disks alloy VT18U]: Sb. statej 2-j Mezhdunarodnoj konferencii «Deformacija i razrushenie materialov i nanomaterialov». M.: IMET im. A.A. Bajkova. 2007. S. 301–303.
6. Kashapov O.S., Nochovnaja N.A. i dr. Osobnosti haraktera razrushenija i strukturno-fazovogo sostojanija novogo zharoprochnogo titanovogo splava [Features of nature destruction and structural-phase state of a new heat-resistant titanium alloy] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №2. S. 39–42.