

УДК 621.01:539.431

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-97

К.А. Бадиков<sup>1</sup>, А.Н. Савкин<sup>2</sup>, Д.Ю. Абалхан<sup>3</sup>, К.И. Сенцов<sup>4</sup>

## **ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НАГРУЖЕНИЯ И АСИММЕТРИИ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РОСТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ПРИ РЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ**



<sup>1</sup>Кирилл Андреевич Бадиков

Волгоградский государственный технический университет

Россия, Волгоград

Тел.: 8(8442)24-80-13, E-mail: badikov\_kirill@mail.ru



<sup>2</sup>Алексей Николаевич Савкин

Волгоградский государственный технический университет

Россия, Волгоград

Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: savkin@vstu.ru



<sup>3</sup>Данила Юрьевич Абалхан

Волгоградский государственный технический университет

Россия, Волгоград

Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: abalhandanil@mail.ru



<sup>4</sup>Кирилл Игоревич Сенцов

Волгоградский государственный технический университет

Россия, Волгоград

Тел.: 8(8442)24-81-37, E-mail: sen127@yandex.ru

### **Аннотация**

Исследована продолжительность роста усталостной трещины титанового сплава ПТ-3В (псевдо- $\alpha$  структура) при регулярном типе циклического нагружения. Рассмотрено влияние разной асимметрии и значения нагрузки на рост усталостных трещин в указанном титановом сплаве. Получены экспериментальные данные кинетики роста усталостных трещин при таком типе нагружения. Проведен анализ кинетики роста трещин в зависимости от свойства материала, изучения полученных кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР) и фрактографических особенностей развития трещин. Обсуждаются механизмы такого поведения трещин и моделирования продолжительности ее развития.

*Ключевые слова:* титановый сплав; кинетика роста усталостной трещины; моделирование продолжительности роста трещины.

## **Введение**

Многие конструкции в эксплуатации испытывают переменную нагруженность, в результате которой в конструктивных элементах могут возникать усталостные трещины [1,2]. Рост усталостных трещин при достижении их критических размеров приводят к разрушению элемента. Существует несколько причин, обосновывающие необходимость прогнозирования роста трещин, например, это важно для технических служб для определения остаточного ресурса изделия, а также позволяет правильно выбрать материал, который более устойчив к росту усталостных трещин, следовательно, более пригоден для заданных условий эксплуатации. В научной литературе имеется много публикаций по исследованию поведения различных конструкционных сплавов при разных силовых воздействиях в том числе и в эксплуатационных [3-5], т.к. трещиностойкость материалов достаточно интенсивно исследуется много лет разными учеными, например, Палмгреном, Майнером, Хедом, Трощенко, Стрижиусом и другими. Среди материалов, которые находят в современных условиях все большее применение при изготовлении конструкций, работающих в экстремальных внешних силовых и температурных воздействиях, следует отметить титановые сплавы.

В настоящей работе была изучена кинетика роста усталостной трещины в титановом сплаве ПТ-3В с псевдо- $\alpha$  структурой при регулярном циклическом нагружении (Constant Amplitude Loading CAL) с разной асимметрией  $R$ . Проведен анализ продолжительности роста трещины путем сравнения расчета «цикл-за-цикл» с полученными экспериментальными данными.

## **Материалы и методы исследования**

Для испытания использовали псевдо- $\alpha$  титановый сплав ПТ-3В, используемый в изготовлении различных конструкций. Он широко используется также как жаропрочный сплав, представляющий собой твердый раствор (ГОСТ 19807-91), сохраняет многие достоинства  $\alpha$ - и  $\alpha+\beta$  сплавов. Он хорошо свариваются сваркой всех видов. Псевдо- $\alpha$  сплавы, имеет удовлетворительную технологическую пластичность в горячем и холодном состоянии, близкую к пластичности  $\alpha+\beta$  сплавов [6, 7]. Химический состав титанового сплава определен на основании рентгенофлуоресцентного анализа на энергодисперсионном спектрометре

Shimadzu серии EDX-8000 и показан в таблице 1. Механические свойства в состоянии поставки представлены в таблице 2.

**Таблица 1.** Химический состав исследуемого титанового сплава

Титановый сплав	Тип структуры	Химический состав в %				
		<i>Ti</i>	<i>AL</i>	<i>V</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>
ПТ-3В	псевдо- $\alpha$	92.0	5.68	1.5-2.0	0.199	0.137

**Таблица 2.** Механические свойства исследуемого титанового сплава

Наименование	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$E \cdot 10^5$ МПа
ПТ-3В	764	660	10.6	1.06

На рис.1 показана его исходная микроструктура в состоянии поставки с увеличением  $\times 5000$ . Для сплава ПТ-3В фрагменты  $\alpha$ -фазы представлены зернами размерами 180-250 nm и вытянутыми пластинами  $\alpha$ - фазы. Испытания на определение усталостной долговечности проводились на сервогидравлической машине Nano 25 kN фирмы Biss (Индия). Испытательная машина оснащена программным обеспечением, позволяющим автоматически обрабатывать результаты испытаний.



**Рис. 1.** Микроструктура титанового сплава ПТ-3В в исходном состоянии, глобулярная структура (увеличение  $\times 5000$ )

Методика испытаний соответствовала требованиям ASTM E647-08 [8]. Испытания проводили на компактных образцах типа С(Т), изготовленного из листового проката толщиной 5 мм. Предварительное растрескивание для всех испытаний проводилось с параметрами:  $P_{max}=3$  кН,  $R=0.1$  до  $a_0=14$  мм. Для измерения длины трещины использовался метод податливости.

Он предусматривает использование датчика открытия трещины, измеряющего расстояние между кромками образца. Были проведены циклические нагружения при регулярном нагружения. Для блока регулярного нагружения с целью изучения влияния асимметрии цикла на

продолжительность роста трещины варьировалась асимметрия циклов  $R$  от 0.1 до 0.7, а максимальная нагрузка  $P_{\max}$  от 3 до 5 кН. Программа проведенных испытаний представлена в таблице 3.

**Таблица 3.** Программа исследований титанового сплава ТТ-3В исходная глобулярная структура (результаты экспериментов  $N_{\Sigma}$  и расчетов  $N_{P}$  в циклах)

№ п/п	Нагружение	$N_{\Sigma}$	$N_{P}$ (Пэрис)	$N_{P}$ (Форман-Мэтти)
1	CAL $P_{\max}=5$ кН, $R=0.1$	30032	25910	36500
2	CAL $P_{\max}=5$ кН, $R=0.3$	36037	44650	60160
3	CAL $P_{\max}=5$ кН, $R=0.5$	75076	99960	125500
4	CAL $P_{\max}=5$ кН, $R=0.7$	447448	315100	396800
5	CAL $P_{\max}=4$ кН, $R=0.5$	190191	211600	280100
6	CAL $P_{\max}=4$ кН, $R=0.7$	939940	667100	940800
7	CAL $P_{\max}=3$ кН, $R=0.5$	536537	554800	816700
8	CAL $P_{\max}=3$ кН, $R=0.7$	2772535	1749000	3061000

### Зарождение усталостной трещины в концентраторе напряжений

Для оценки кинетики трещины при различных амплитудах переменного циклического нагружения проводится предварительное циклическое нагружение  $P_{\max} = 3$  кН  $R = 0.1$ , при регулярном нагружении с развитием трещины от концентратора  $a=8.5$  мм до  $a=14$  мм. В дальнейшем проходили испытания по оценке влияния различных параметров силового нагружения согласно представленной программе испытаний на изменение продолжительности роста усталостных трещин.

Для изучения зарождения усталостной трещины были проведены фрактографические исследования поверхностей разрушения. Отмечено, что зарождение усталостной трещины в концентраторе напряжений проходило не по всей поверхности надреза, а лишь в некоторых местах, где микроскопические повреждения способствовали дополнительной концентрации напряжений на поверхности концентратора.

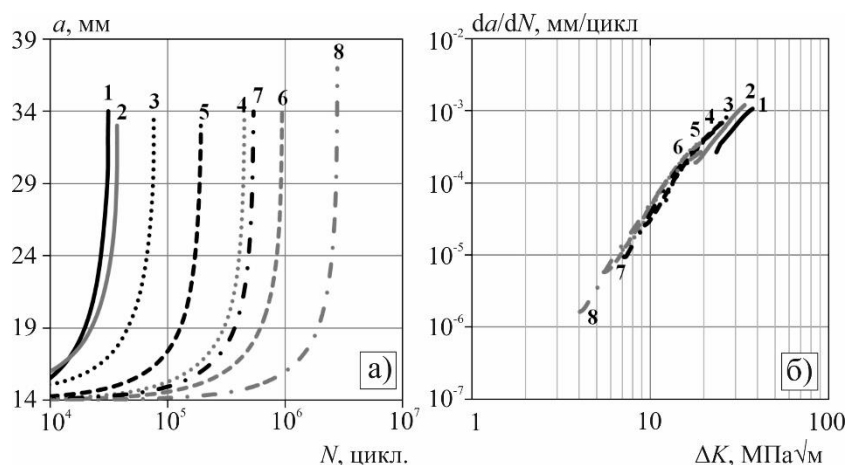
Эксплуатационное нагружение конструкций, испытывающих переменные нагрузки, носят в основном нерегулярный, стохастический характер. Однако, изучение физической природы усталостного разрушения необходимо начинать с регулярного нагружения, позволяющего в дальнейшем проводить анализ различных аспектов разрушения и моделировать этот процесс. На кинетику развития трещин при регулярном нагружении оказывают влияние значения максимальной нагрузки  $P_{\max}$ , ее размах  $\Delta P$ , также асимметрия цикла нагружения  $R$ . В настоящей работе использовался подход линейной механики разрушения, согласно которому

прочность трехмерных тел с трещинами оценивается коэффициентом интенсивности напряжений (КИН). На основании зависимостей кинетики роста трещины  $a\text{-lg}N$  (длина трещины в мм – долговечность в циклах), полученных с использованием датчика раскрытия трещины, была оценена скорость роста  $da/dN$  от размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  в устье трещины. Коэффициент интенсивности напряжений для используемых в данной работе компактных С(Т) образцов определялся по формуле согласно стандарту ASTM E647 [8]:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{1.5}} \cdot (0.886 + 4.64 \cdot \alpha - 13.32 \cdot \alpha^2 + 14.72 \cdot \alpha^3 - 5.6 \cdot \alpha^4) \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – размах нагружения, который является разницей между максимальной и минимальной нагрузкой цикла,  $a$  – длина трещины,  $W$  – ширина образца,  $\alpha = a/W$ , при условии, что  $\alpha \geq 0.2$ .

На рисунке 2 представлены экспериментальные данные, а именно на 2а – экспериментальная продолжительность роста трещин  $N$ , в зависимости от длины трещины  $a$ , на рис. 2б – кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Номера кривых соответствуют номерам испытаний в таблице 3.



**Рис. 2.** Кривые роста (а) и КДУР (б) при испытаниях регулярным нагружением с различной асимметрией  $R$  и  $P_{\max}$  для титанового сплава ПТ-3В

В рабочих условиях многие детали конструкций подвергаются нагружениям с разной асимметрией  $R$ . Асимметрия цикла, возникающая под воздействием прикладываемого среднего статического напряжения, является одним из факторов, влияющих на кинетику роста усталостной трещины в конструкционных материалах. В случае определения циклической трещиностойкости асимметрия определяется:

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}} \quad (2)$$

Скорость распространения усталостной трещины уменьшается с увеличением  $R$  и вызывает сдвиг критических значений КИН (порогового

значения КИН  $\Delta K_{th}$  на околопороговый участок скорости ее роста и КИН  $K_c$  – вязкости разрушения на участке устойчивого отрыва [5] влево (рис. 2). Таким образом, при увеличении  $R$  значительно снижаются  $\Delta K_{th}$  и  $\Delta K_c$ . Объяснение влияния  $R$  на скорость роста трещины основано на анализе эффекта закрытия трещины. Он проявляется преждевременным контактом берегов растущей усталостной трещины на протяжении некоторой положительной части цикла напряжений раньше, чем нагрузка достигнет нуля. Повышение коэффициента асимметрии в сторону положительных значений вызывает снижение закрытия трещины и скорости ее роста. Ослабление роли закрытия трещины по мере роста коэффициента асимметрии объясняется тем, что происходит сближение значений минимального КИН  $K_{min}$  и КИН, характеризующего момент открытия (орен) трещины  $K_{op}$ . При более высоких значениях  $R$  уменьшается размах коэффициента интенсивности напряжений, соответствующей закрытой трещине и следовательно, уменьшается эффективный размах  $\Delta K_{эфф}$ . Поэтому для описания закрытия трещины было введено понятие относительного коэффициента закрытия трещины  $U$  [9]:

$$U = \frac{\Delta K_{эфф}}{\Delta K} \quad (3)$$

Имеется ряд предложений по учету этого явления. На основании испытаний алюминиевого сплава 2024-T3 при регулярном нагружении с асимметрией  $0.1 \leq R \leq 0.7$  Эльбер предложил формулу [10]:

$$U = 0.5 + 0.4R \quad (4)$$

Схайве уточнил формулу Эльбера для асимметрии  $-1 \leq R \leq 0.54$  [11]:

$$U = 0.55 + 0.33R + 0.12R^2 \quad (5)$$

В работе [12] предложена зависимость:

$$U = 0.5686 + 0.1571R + 0.5314R^2 - 0.4271R^3 - 2.5839R^4 + 6.1548R^5 - 3.1301R^6 \quad (6)$$

Для припорогового роста усталостной трещины характерны низкие скорости ее роста. Это создает благоприятные условия для замыкания трещины в положительной области ее нагружения в связи с наличием в устье трещины инородных вторичных частиц, окислов, изменения рельефа зерна в пределах его размера.

Испытания титанового сплава ПТ-3В (рис. 2) в исходном состоянии поставки (глобулярная структура) при регулярном нагружении при  $R=0.3-0.7$  и  $P_{max}=3-5$  кН показали, что постоянные на участке Пэриса на КДУР составили  $C = 4 \cdot 10^{-13}$  и  $n = 3.35$ , а сами кривые КДУР располагались в узком диапазоне эквидистантных кривых, связанных с различием коэффициента асимметрии  $R$  и размаха переменной нагрузки в пределах 1.2-4.5 кН. Так, чем выше асимметрия цикла  $R$  и ниже размах нагрузки при постоянном  $P_{max}$  тем выше продолжительность роста усталостной

трещины. Кривая КДУР смещается вниз и немного влево по сравнению с кривыми КДУР при асимметриях  $R=0.5$  и  $0.3$ .

На рис. 3 показана взаимосвязь асимметрии цикла нагружения  $R$  и продолжительности роста усталостной трещины для ПТ-3В, влияние  $P_{\max}$  четко проявляется. С увеличением  $P_{\max}$  наблюдается снижение продолжительности роста трещины  $N$  до разрушения в диапазоне  $R=0.5-0.7$ , в диапазоне  $R=0.3-0.1$  такого различия не наблюдается. Это можно объяснить, что при одинаковом  $R=0.7$  для  $P_{\max}=5$  кН – размах нагрузки  $\Delta P=1.5$  кН, а при  $P_{\max}=4$  кН  $\Delta P=1.2$  кН, что снижает скорость роста трещины.

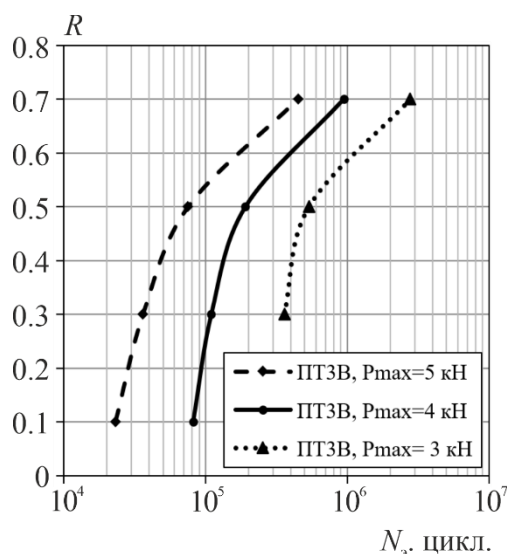


Рис. 3. Продолжительность роста усталостной трещины  $N_g$  в циклах в зависимости асимметрии цикла  $R$  для ПТ-3В

С другой стороны, в устье трещины при ее росте возникает пластическая зона. Невысокие значения предела прочности и предела текучести могут привести к увеличению пластической зоны в концентраторе – устье усталостной трещины и способствовать замедлению трещины и увеличению продолжительности ее роста. Также на усталостные характеристики влияют механические свойства сплава.

### Прогнозировании роста усталостной трещины.

Для оценки продолжительности роста трещины обычно применяется линейная механика разрушения, основанная на использовании коэффициента интенсивности напряжений (КИН) как основного фактора, определяющего скорость роста усталостной трещины. Влиянием пластической зоны в устье усталостной трещины при этом зачастую пренебрегают в связи с её малостью по сравнению с длиной трещины. Для

металлов скорость трещины описывается простыми соотношениями типа Пэриса – Эрдогана [13]:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n \quad (7)$$

где  $C$ ,  $n$  – константы материала,  $\Delta K$  – размах коэффициента интенсивности разрушения на возрастающем полцикле. Тем не менее, изучение других работ [14-15] показало влияние на скорость роста трещины и других параметров нагружения.

Скорость роста трещины оценивается КДУР и может различаться в широких пределах даже для одного материала [16]. Основными характеристиками КДУР являются  $C$ ,  $n$ , пороговый коэффициент интенсивности напряжений  $\Delta K_{th}$  и вязкость разрушения  $K_c$ , поэтому их следует учитывать при определении скорости роста трещины. Уравнения скорости роста трещины, основанные на законе Пэриса, опираются на размах КИН  $\Delta K$ , выражающий циклическое скольжение, и асимметрию цикла  $R$ , характеризующую влияние среднего напряжения на долговечность и описывают поведение трещины на втором участке КДУР. На основании уравнения (3) эквивалентное значение  $\Delta K_{эфф}$ , учитывающее закрытие трещины  $U$  и характер переменного нагружения  $V$  определяется:

$$\Delta K_{эфф i} = \Delta K_i \cdot U \cdot V \quad (8)$$

Значения коэффициента закрытия трещины  $U$  для разных материалов, представлены уравнениями (4-6). При этом характер переменного нагружения  $V$  для регулярного нагружения принимался равным единице [9].

К настоящему времени для описания всех трёх участков кинетической диаграммы предложено большое количество математических моделей, которые содержат от четырёх до восьми подлежащих экспериментальному определению параметров [17, 18]. Модифицированное уравнение Формана-Мэтту оценивает скорость роста трещины на всех трех участках КДУР, для этого в уравнение вводятся дополнительные константы трещиностойкости материала: пороговое значение КИН  $\Delta K_{th}$  на околопороговый участок скорости ее роста и КИН  $K_c$  – вязкость разрушения на участке устойчивого отрыва [17]:

$$da/dN = C \cdot \Delta K_{эфф}^n \cdot \left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_{эфф}}\right)^p / \left(1 - \frac{K_{max}}{K_c}\right)^q \quad (9)$$

Для уравнения Формана-Мэтту необходимо получить экспериментальным путём три параметра:  $C$ ,  $n$  и критическое значение коэффициента интенсивности напряжения  $K_c$ .  $p$ ,  $q$  – коэффициенты аппроксимации. В данном исследовании значения  $\Delta K_{th}$  и  $K_c$  принимались



постоянными, соответствующие регулярному циклическому нагружению, взаимодействия последовательностей нагрузок не учитывались.

Суммирование приращений длин трещин на каждом цикле или в результате каждого повторения блока истории нагружения позволяет определить долговечность поцикловым методом расчета:

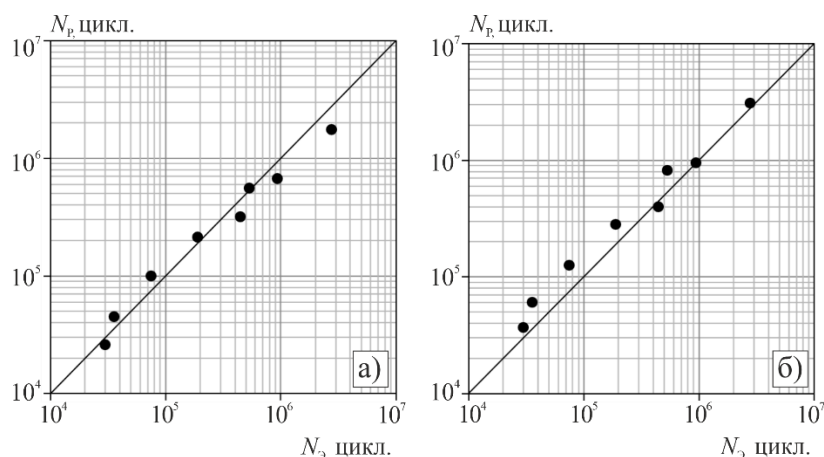
$$N_f = \frac{a_f - a_0}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left( \frac{da}{dN} \right)_{ij}}, \quad (10)$$

где  $a_f$  – критическая длина трещины;  $a_0$  – начальная длина трещины;  $n$  – число циклов истории нагружения;  $m$  – число повторений блока истории нагружения;  $(da/dN)_{ij}$  – скорость роста трещины и приращение на  $i$  цикле  $j$  повторения блока истории нагружения [19, 20].

После каждого приращения длины трещины выполняется сравнение текущей длины трещины с предельной. По достижению длиной трещины предельной величины подсчет числа отработавших циклов завершается, представляющих собой расчетный срок службы конструкции до отказа.

## Результаты

На рис. 4 показаны соотношения экспериментальной продолжительности роста трещины  $N_{\text{Э}}$  и расчетной  $N_{\text{Р}}$ , определенной с использованием модели «цикл-за-цикл» по уравнению Пэриса (7) и Формана-Мэтту (9) с учетом эффективного значения КИН. Анализ результатов расчета и эксперимента показал их хорошую сходимость как при высокой, так и низкой продолжительности роста усталостной трещины.



**Рис. 4.** Расчет продолжительности роста трещины методом «цикл-за-цикл» по Пэрису (а) и модифицированной формуле Формана-Мэтту (б)

Полученные коэффициенты корреляции довольно высоки и составляют около 95%, что свидетельствует о том, что введение параметра

$\Delta K_{эфф}$  в модель по оценке продолжительности роста трещины однозначно может описывать влияние различных силовых параметров, асимметрии и характер нерегулярного нагружения на интенсивность напряжений в устье растущей усталостной трещины.

### **Заключение**

По итогам работы можно сделать следующие выводы.

1) Увеличение асимметрии  $R$  при прочих равных силовых воздействиях замедляют скорость роста усталостной трещины титанового сплава ПТЗВ.

2) Показано влияние различных силовых параметров нагружения на продолжительность роста усталостной трещины на среднеамплитудном участке КДУР. Снижение размаха нагрузки замедляет рост трещины.

3) Результаты расчета по предложенному авторами уравнению для определения продолжительности роста трещины, а также ее оценка с помощью метода «цикл-за-цикл», достаточно хорошо коррелируют с экспериментальными результатами. Поэтому авторы считают использование данных методов определения продолжительности роста целесообразными.

*Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (РНФ), проект 23-79-01269.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Швечков Е.И. Характеристики трещиностойкости металлических материалов // Технология легких сплавов. 2023. №2. С. 62-69. DOI: 10.24412/0321-4664-2023-2-62-69
- [2] Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 288 с.
- [3] Scotti L., Mottura A. First-principles investigation of solute diffusion mechanisms in alpha-Ti/ Proceedings of the 13th World Conference on Titanium. 2016. pp.1901-1906. DOI:10.1002/9781119296126.ch318.
- [4] Партон В.З. Механика разрушения: от теории к практике. – М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. лит., 1990. – 240 с.
- [5] Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов: справ. Пособие в 4 томах. – Киев: Наукова Думка, 1988. – 620 с.
- [6] Андреев П.В. Рентгенодифракционные исследования фазового состава  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов/ П.В. Андреев, К.Е. Сметанина, Д.А. Гудзь, Н.Ю. Табачкова, Я.С. Шадрина // Заводская

- лаборатория. Диагностика материалов, 2020, т.86, №9, с.45-51.  
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-9-45-51>
- [7] Глазунов С.Г. Конструкционные титановые сплавы / С.Г. Глазунов, Моисеев В.Н. // М., Металлургия, 1974, 368 с.
- [8] ASTM E647-13ae1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates / ASTM International, West Conshohocken, PA. – 2013.
- [9] Савкин А.Н. Прогнозирование усталостной долговечности высоконагруженных конструкций: монография / А. Н. Савкин, В. П. Багмутов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – 364 с.
- [10] Elber W. The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures / ASTM STP 486 / Ed. C. W. Smith. – 1971. – P. 230-242.
- [11] Schijve J. Fatigue crack closure: Observations and technical significance / Ed. J. C. Newman, W. Elber // ASTM STP 982. – 1988. – P. 5-35.
- [12] Емельянов О.В. Определение характеристик сопротивления стали развитию трещин при циклическом изменении нагрузки / О.В. Емельянов, И.А. Лядецкий // Строительные материалы и изделия: Межвузовский сборник научных трудов. Магнитогорск, МГТУ, 2002.
- [13] Paris P.C. The fracture mechanics approach to fatigue, fatigue an interdisciplinaty approach. Syracuse University Press, Syracuse, N.Y., 1964. – P. 107-132.
- [14] Johnson H. U. The growth of fatigue cracks due to variations in load / H. U. Johnson, P. C. Paris // Journ. Fract.Mech. – 1968. – V.1. - p. 1–45.
- [15] Сафин Э.В. Формирование и оценка показателей качества титанового сплава ВТ6 с ультрамелкозернистой структурой // Universum: технические науки. 2017. №12 (45).
- [16] Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский // Киев: Наукова думка, 1987. – 175 с.
- [17] Forman R. G. Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory / R. G. Forman // Engineering Fracture Mechanics. – 1972. – Vol. 4. No. 2. – p. 333-345.
- [18] Гладковский С.В. Влияние режимов термической обработки на характеристики трещиностойкости и механизмы разрушения метастабильного титанового сплава ВТ23/ Гладковский С.В., Веселова В.Е., Дубинский С.В. и др. // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2023. №1. С. 16-26. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.02
- [19] Изюмова А.Ю. Развитие экспериментальной методики оценки эволюции усталостной трещины в титановых сплавах на основе энергетического подхода / А.Ю. Изюмова, А.Н. Вшивков, О.А.

Плехов // Физическая мезомеханика, 2023. №5. С. 61-70. DOI 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_5\_61

- [20] Савкин А.Н. Исследование кинетики роста усталостных трещин в сталях в зависимости от характера переменного нагружения / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2018. – Т. 84, № 3. – С. 43-51.

К.А. Badikov, A.N. Savkin, D.Yu. Abalhan, K.I. Sentsov

## INFLUENCE OF LOAD AMOUNT AND ASYMMETRY ON THE DURATION OF GROWTH OF A FATIGUE CRACK IN A TITANIUM ALLOY UNDER REGULAR LOADING

Volgograd State Technical University, Russia

### Abstract

The duration of growth of a fatigue crack in titanium alloy PT-3V (pseudo- $\alpha$  structure) under a regular type of cyclic loading has been studied. The influence of different asymmetries and load values on the growth of fatigue cracks in the specified titanium alloy is considered. Experimental data on the kinetics of fatigue crack growth under this type of loading were obtained. An analysis of the kinetics of crack growth was carried out depending on the properties of the material, a study of the obtained fatigue fracture kinetics diagrams (henceforth FFKD) and fractographic features of crack development. The mechanisms of this behavior of cracks and modeling the duration of its development are discussed.

*Key words:* titanium alloy; fatigue crack growth kinetics; modeling the durability of crack growth.

### REFERENCES

- [1] Shvechkov E.I. Characteristics of crack resistance of metal materials // Technology of light alloys. 2023. No. 2. pp. 62-69. DOI: 10.24412/0321-4664-2023-2-62-69 (rus.)
- [2] Terentyev V.F. Fatigue strength of metals and alloys. M.: Internet Engineering, 2002. – 288 p. (rus.)
- [3] Scotti L., Mottura A. First-principles investigation of solute diffusion mechanisms in alpha-Ti/ Proceedings of the 13th World Conference on Titanium. 2016. pp.1901-1906. DOI:10.1002/9781119296126.ch318.
- [4] Parton, W.Z. Fracture mechanics: from theory to practice. – M.: Science. Phys.-mat. literature, 1990. – 240 p.

- [5] Panasyuk, V.V. Fracture mechanics and strength of materials: reference book. Manual in 4 volumes. – Kyiv: Naukova Dumka, 1988. – 620 p. (rus.)
- [6] Andreev P.V. X-ray diffraction studies of the phase composition of  $\alpha$ - and pseudo- $\alpha$ -titanium alloys/ P.V. Andreev, K.E. Smetanina, D.A. Gudz, N.Yu. Tabachkova, Ya.S. Shadrina // Factory laboratory. Diagnostics of materials, 2020, v. 86, no. 9, pp. 45-51. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-9-45-51> (rus.)
- [7] Glazunov S.G. Structural titanium alloys / S.G. Glazunov, Moiseev V.N. // M., Metallurgy, 1974, 368 p. (rus.)
- [8] ASTM E647-13ae1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates / ASTM International, West Conshohocken, PA. – 2013.
- [9] Savkin A.N. Forecasting the fatigue life of highly loaded structures: monograph / A. N. Savkin, V. P. Bagmutov; Volga State Technical University. – Volgograd, 2013. – 364 p. (rus.)
- [10] Elber W. The significance of fatigue crack closure. Damage tolerance in aircraft structures / ASTM STP 486 / Ed. C. W. Smith. – 1971. – P. 230-242.
- [11] Schijve, J. Fatigue crack closure: Observations and technical significance / Ed. J. C. Newman, W. Elber // ASTM STP 982. – 1988. – P. 5-35.
- [12] Emelyanov O.V. Determination of steel resistance characteristics to crack development under cyclic load changes / O.V. Emelyanov, I.A. Lyadetsky // Construction materials and products: Interuniversity collection of scientific papers. Magnitogorsk, MSTU, 2002. (rus.)
- [13] Paris P.C. The fracture mechanics approach to fatigue, fatigue an interdisciplinary approach. Syracuse University Press, Syracuse, N.Y., 1964. – P. 107-132.
- [14] Johnson H. U. The growth of fatigue cracks due to variations in load / H. U. Johnson, P. C. Paris // Journ. Fract.Mech. – 1968. – V.1. - p. 1–45.
- [15] Safin E.V. Formation and assessment of quality indicators of VT6 titanium alloy with ultra-fine-grained structure // Universum: technical sciences. 2017. No. 12 (45). (rus.)
- [16] Troshchenko V.T. Fatigue resistance of metals and alloys / V.T. Troshchenko, L.A. Sosnovsky // Kyiv: Naukova Dumka, 1987. – 175 p. (rus.)
- [17] Forman R. G. Study of fatigue crack initiation from flaws using fracture mechanics theory / R. G. Forman // Engineering Fracture Mechanics. – 1972. – Vol. 4. No. 2. – p. 333-345.
- [18] Gladkovsky S.V. Influence of heat treatment modes on the crack resistance characteristics and fracture mechanisms of metastable titanium alloy VT23 / Gladkovsky S.V., Veselova V.E., Dubinsky S.V. and etc. // Bulletin of

- PNIPU. Mechanical engineering, materials science. 2023. No. 1. pp. 16-26. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.1.02 (rus.)
- [19] Izyumova A.Yu. Development of an experimental methodology for assessing the evolution of fatigue cracks in titanium alloys based on the energy approach / A.Yu. Izyumova, A.N. Vshivkov, O.A. Plekhov // Physical mesomechanics, 2023. No. 5. pp. 61-70. DOI 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_5\_61 (rus.)
- [20] Savkin A.N. Study of the kinetics of growth of fatigue cracks in steels depending on the nature of alternating loading / A.N. Savkin, A.V. Andronik, K.A. Badikov, A.A. Sedov // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov, 2018. – T. 84, No. 3. – P. 43-51. (rus.)