

УДК 539.388.1:669.018.44:669.295

М.А. Горбовец<sup>1</sup>, Н.А. Ночовная<sup>1</sup>

## О ПАРАМЕТРАХ УРАВНЕНИЯ ПЭРИСА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СКОРОСТЬ РОСТА ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-2-2

*Скорость роста трещины усталости (СРТУ) является необходимой составляющей в комплексе механических свойств, который характеризует надежность материалов для авиационной техники.*

*Проведено исследование СРТУ жаропрочных титановых сплавов VT8-1, VT41, VIT1 при комнатной и рабочих температурах, двух коэффициентах асимметрии цикла (0,1 и 0,5). Установлено, что параметры уравнения Пэриса (С и n) для исследованных жаропрочных титановых сплавов не являются независимыми и аппроксимируются общей прямой линией в координатах «lgC–lgn».*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** усталость, скорость роста трещины усталости (СРТУ), цикл нагружения, трещина, уравнение Пэриса, коэффициент интенсивности напряжений (КИН), титановый сплав.

*Fatigue crack growth rate (FCGR) is a necessary component in the complex of mechanical properties characterizing reliability of materials for aviation engineering.*

*Research of FCGR of heat-resistant titanium alloys VT8-1, VT41, VIT1 is conducted at room and working temperatures, two cycle ratios (0,1 and 0,5). It is established that parameters of Paris equation (C and n) for the studied heat-resistant titanium alloys are not independent and are approximated by the general direct line in «lgC–lgn» coordinates.*

*Investigation is executed within implementation of the complex scientific direction 2.2. «Qualification and researches of materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** fatigue, FCGR, crack growth rate, test technique, cycle of load, Paris curve, stress intensity factor, titanium alloy.

---

<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

### Введение

Жаропрочные титановые сплавы широко применяются в качестве материалов для ответственных деталей газотурбинных энергетических установок [1–3]. В процессе эксплуатации материал деталей подвергается сложному температурно-силовому нагружению. Основным критерием сравнения и применимости материалов в конструкции являются их механические характеристики прочности. Для жаропрочных титановых сплавов большое значение имеют характеристики прочности, определяемые при высоких температурах [4–6].

Для материалов ротора компрессора большое значение имеет исследование сопротивления циклическим нагрузкам, скорости роста трещины усталости (СРТУ) и определение соответствующих характеристик [2, 3]. Величина СРТУ характеризует

главным образом надежность материала, его возможность сохранять работоспособность в условиях имеющегося повреждения в виде трещины усталости некоторого размера [4–10].

При определении характеристик СРТУ существует несколько параметров испытаний, которые могут оказывать влияние на результат; среди основных: температура испытания, коэффициент асимметрии цикла нагружения, частота нагружения [11–16].

В связи с этим большой интерес представляет изучение влияния изменения указанных параметров испытания на характеристики СРТУ жаропрочных титановых сплавов марок ВТ8, ВТ41, ВИТ1, которые являются одними из наиболее перспективных материалов для деталей ГТД [6, 8, 10, 12, 14].

### Материалы и методы

Для исследования влияния параметров нагружения на СРТУ изготовлены штамповки из жаропрочных титановых сплавов разных классов: ( $\alpha+\beta$ )-сплав ВТ8-1; псевдо- $\alpha$ -сплав ВТ41 и интерметаллидный орто-сплав ВИТ1. Полуфабрикаты изготавливали по слитковой технологии, принятой для титановых сплавов с использованием серийных лигатур. Для выплавки слитков сплава применяли вакуумно-дуговой переплав. Литые заготовки подвергали горячей обработке давлением – ковке на промежуточную заготовку с последующей изотермической штамповкой, после чего заготовки подвергали термической обработке. Режимы обработки подобрали таким образом, чтобы получить для сплава ВТ41 заготовки с глобулярно-пластинчатой и пластинчатой структурами, а для сплава ВИТ1 – с глобулярной и пластинчато-глобулярной структурами.

Из полученных заготовок изготовили компактные образцы типа «СТ» для испытаний на СРТУ при внецентренном растяжении с базовым размером  $W=40$  мм, толщиной  $B=10$  мм и прямым надрезом. Надрез выполняли электроискровым способом, радиус в вершине надреза составлял 0,2 мм.

Таблица 1

Варианты режимов испытаний						
Сплав	Тип структуры	Температура испытания, °С	Коэффициент асимметрии цикла нагружения $R$			
			0,1		0,5	
			при частоте нагружения, Гц			
			7	15	7	15
ВТ8-1	Глобулярно-пластинчатая	20				
		450				
ВТ41	Глобулярно-пластинчатая	20	–		–	–
		600	–		–	–
	Пластинчатая	20	–		–	
		600	–		–	
ВИТ1	Глобулярная	20	–		–	
		600	–		–	
		650	–		–	
	Пластинчато-глобулярная	20	–		–	–
		600	–		–	–
		650	–		–	

Температуру испытания выбрали исходя из области применения сплавов (табл. 1). Коэффициенты асимметрии цикла нагружения ( $R$ ) составили 0,1 и 0,5 (как наиболее часто используемые). Частота испытаний ( $f$ ) выбрана исходя из возможности датчика раскрытия трещины: 15 (максимальная рабочая частота) и 7 Гц (половина от максимальной частоты). Испытания проводили при комбинировании различных сочетаний указанных факторов нагружения (табл. 1 – цветом выделены применяемые режимы).

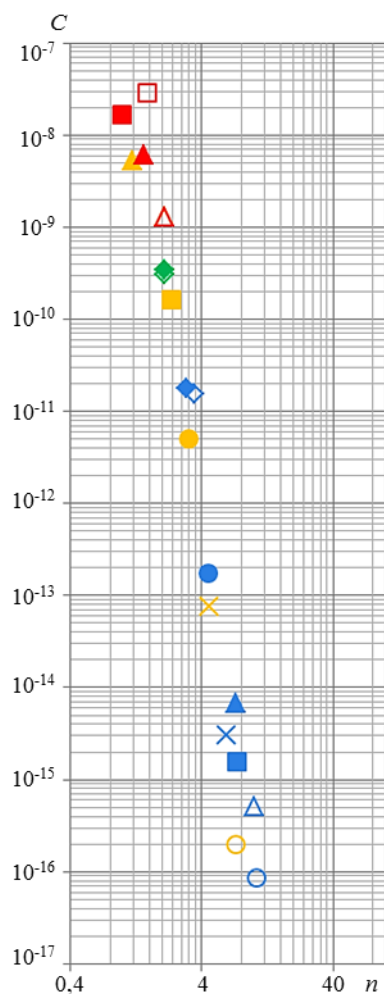
Испытания на СРТУ проведены по методике, соответствующей требованиям стандарта ASTM E647 и РД 50-345-82 [14, 16, 17], на сервогидравлической испытательной машине PSB25 фирмы Schenck. Длину трещины измеряли методом податливости при помощи датчика раскрытия трещины фирмы Schenck. Управление испытанием и сбор данных осуществляли при помощи компьютера со специализированным программным обеспечением.

Для испытаний вначале при комнатной температуре выращивали предварительную трещину при выбранных для каждого испытания постоянной частоте и коэффициенте асимметрии цикла. Размах  $\Delta K$  коэффициента интенсивности напряжений (КИН) уменьшали по ступенчатому режиму по мере увеличения длины трещины. Нанесение начальной трещины осуществляли до достижения общего приращения длины нанесенной трещины 1,5–2 мм. Для всех испытанных образцов исходная трещина располагалась в плоскости, перпендикулярной направлению действия приложенной силы и имела одинаковую длину по фронту развития. Далее проводили испытания образцов с нанесенной трещиной по режимам, указанным в табл. 1, поддерживая постоянный размах нагрузки  $\Delta P$ , величина которой превышала приложенную на завершающем этапе при нанесении исходной трещины. При каждом режиме испытывали не менее двух образцов, при выведении средних результатов учитывали рекомендации, изложенные в работе [18].

### Результаты

Анализ характера макроразрушений образцов показал, что процесс разрушения происходит строго в направлении от вершины надреза в глубь образца. В целом поверхность разрушения имеет плоский характер и располагается перпендикулярно направлению действия нагрузки. На траектории продвижения трещины усталости отсутствуют выпучивания, сужающие сечение образца перед фронтом трещины и искажающие результаты испытаний, что свидетельствует о корректности проведения испытаний.

По результатам испытаний построили кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) [19] с использованием программного обеспечения фирмы Schenck. На диаграммах выделяли линейный участок и анализировали его. Коэффициенты уравнения Пэриса, полученные по результатам обработки, наносили на диаграмму в двойных логарифмических координатах « $\lg C - \lg n$ » (рис. 1). Видно, что для результатов, полученных при рабочих температурах, 90% значений находятся в интервале значений коэффициентов:  $n=0,9-4,5$  и  $C=10^{-8} \div 10^{-14}$ , а при комнатной температуре 80% результатов находятся в интервале значений:  $n=4,5-10,5$  и  $C=10^{-13} \div 10^{-17}$ . Необходимо отметить, что с увеличением коэффициента  $n$  значения  $C$  монотонно убывают.



Сплав	Тип структуры	R	T <sub>исп</sub> , °C	Обозначение	
BT8	ГП	0,5	20	◇	
			450	◇	
	0,1	20	◆		
		450	◆		
BT41	ГП	0,1	20	×	
			600	×	
	П	0,5	20	○	
			600	○	
	П	0,1	20	●	
			600	●	
ВИТ1	Г	0,1	20	▲	
			600	▲	
			650	▲	
			0,5	20	△
				600	△
				650	△
	ПГ	0,1	20	■	
			600	■	
			650	■	
			0,5	20	□
				600	□
				650	□

Рис. 1. Параметры уравнения Пэриса (C и n) для исследованных сплавов с типами структур: глобулярной (Г), пластинчатой (П) и глобулярно-пластинчатой (ГП)

Для каждого сплава результаты на диаграмме «lgC–lgn» располагаются в достаточно узких областях (табл. 2).

Таблица 2

**Интервалы значений коэффициента n для исследованных сплавов**

Температура испытания	Интервал значений коэффициента n для сплавов		
	BT8-1	BT41	ВИТ1
Комнатная	3–3,5	4,5–10,4	7,2–9,95
Рабочая	2,097–2,098	3,1–7	0,98–2,4

Для всех сплавов при прочих равных условиях значения коэффициента n при рабочих температурах ниже, чем при комнатной температуре. Для сплава BT8-1 наименьшая разница между значениями n при разных температурах испытаний, для сплава ВИТ1 – разница наибольшая.

На диаграмме «lgC–lgn» результаты расположены так, что можно предположить, что они подчиняются общей зависимости. Такая закономерность отмечена в нескольких работах [18, 20–25], в большинстве из которых, также как и в работах [19, 21], для никелевых сплавов предложена гипотеза, что коэффициенты уравнения Пэриса описываются прямой линией в полулогарифмических координатах – в основном для значений

коэффициента  $n$ , находящихся в интервале 1,5–4. Для титановых сплавов, исследованных в данной работе, эта зависимость не подходит. Однако в двойных логарифмических координатах данные хорошо аппроксимируются прямой линией (рис. 2), описываемой функцией  $\lg C = a + b \cdot \lg n$  (коэффициенты уравнения составляют  $a = 3 \cdot 10^{-7}$ ,  $b = -9,155$ ). Всего обработана 21 точка, коэффициент корреляции достаточно высокий –  $R^2 = 0,95$ .

Необходимо отметить, что этой зависимостью описываются результаты для сплавов различных классов, испытанных при различных температурах и коэффициентах асимметрии, исследованных в данной работе.

Как известно, испытания на определение СРТУ – достаточно сложны и при проведении таких испытаний очень многое зависит от опыта исследователя. Поэтому одним из важных вопросов является определение критерия, подтверждающего, что полученные результаты корректны, поскольку при проведении испытания и обработке результатов всегда имеет место субъективная оценка исследователя.

Как отмечалось ранее, полученные в этой работе данные по коэффициентам уравнения Пэриса для всех исследованных жаропрочных титановых сплавов при различных температурах испытаний и коэффициентах асимметрии цикла нагружения достаточно хорошо аппроксимируются прямой линией в двойных логарифмических координатах (рис. 2). В связи с этим можно предположить, что соответствие (с определенным допущением) получаемых коэффициентов уравнения Пэриса описанной ранее зависимости может быть справедливо для всех жаропрочных титановых сплавов и служить критерием корректности полученных характеристик.

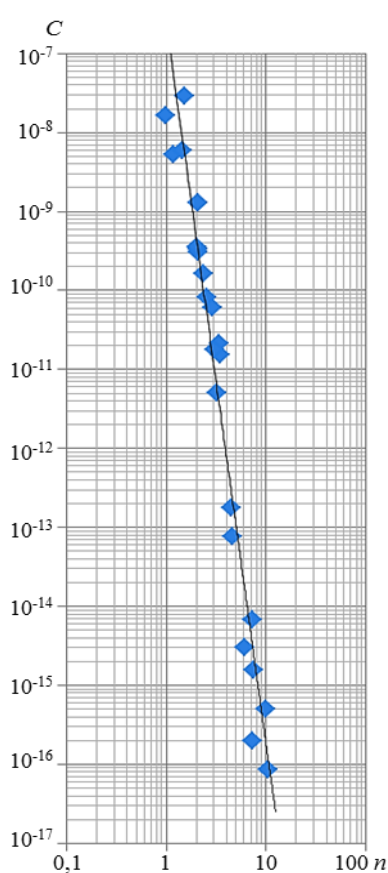


Рис. 2. Аппроксимация результатов испытаний в двойных логарифмических координатах

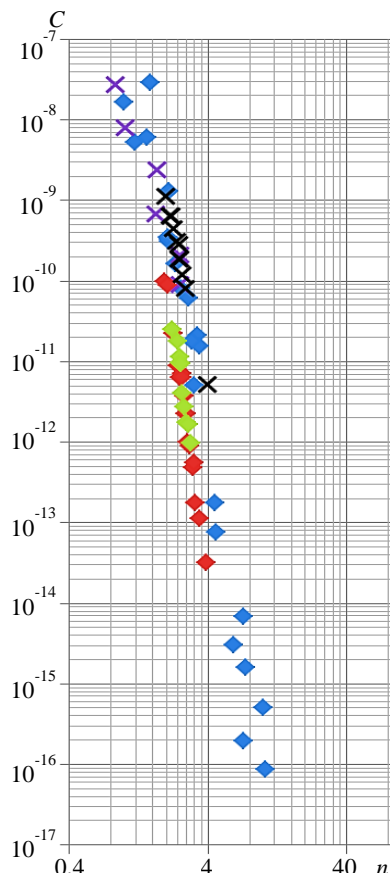


Рис. 3. Результаты исследования (♦) и литературные данные для титановых сплавов ВТ8-1 (♦) [26], ВТ25У (♦) [26], IMI 834 (×) [27] и Ti64 [28, 29], Ti6242 [30], Timetal 834 [31] (×)

Для проверки этого предположения на диаграмму «lgC–lgn» к полученным в работе результатам нанесены данные из литературных источников для сплавов BT8-1 [26], BT25U [26], IMI 834 [27], Ti64 [28, 29], Ti6242 [30], Timetal 834 [31]. Диаграмма приведена на рис. 3. Видно, что результаты, полученные из литературных источников, хорошо согласуются с выдвинутым предположением. Общий массив данных по-прежнему хорошо аппроксимируется прямой линией.

Таким образом, можно предположить, что указанную зависимость можно использовать для проверки корректности результатов испытаний, а также корректности нахождения средних результатов.

### Обсуждение и заключения

1. Установлено, что параметры уравнения Пэриса ( $C$  и  $n$ ) для исследованных жаропрочных титановых сплавов не являются независимыми и аппроксимируются общей прямой линией в координатах «lgC–lgn».

2. Гипотезу о линейной зависимости между коэффициентами уравнения Пэриса в двойных логарифмических координатах можно использовать для проверки корректности полученных результатов для жаропрочных титановых сплавов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15
3. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Павлова Т.В., Иванов В.И. Жаропрочные титановые сплавы // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2007. №3. С. 7–8.
4. Биргер И.А., Балашов Б.Ф., Дульнев Р.А. и др. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1981. 222 с.
5. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
6. Ночовная Н.А. Перспективы и проблемы применения титановых сплавов / В сб. *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2007. Вып. «Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов». С. 4–8.
7. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Машиностроение, 1992. 351 с.
8. Анташев В.Г., Ночовная Н.А. Современное состояние и тенденции развития исследований в области титановых сплавов // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 24–27.
9. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 196–206.
10. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // *Труды ВИАМ: электрон. науч. технич. журн*. 2013. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.01.2016).
11. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 813.
12. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №2. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.01.2016).
13. Проходцева Л.В., Ерасов В.С., Лаврова О.Ю., Лавров А.В. Влияние формы цикла на усталостные свойства и микростроение изломов титанового сплава BT3-1 // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 54–58.

14. Горбовец М.А., Беляев М.С., Ходинев И.А. Влияние эксплуатационной температуры на скорость роста трещины усталости в интерметаллидном титановом сплаве // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 13–15.
15. Проходцева Л.В., Филонова Е.В., Наприенко С.А., Моисеева Н.С. Исследование закономерностей развития процессов разрушения при циклическом нагружении сплава ВТ41 // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 407–412.
16. Беляев М.С., Горбовец М.А., Кашапов О.С., Ходинев И.А. Скорость роста трещины усталости в жаропрочном титановом сплаве ВТ41 // *Проблемы безопасности полетов*. 2013. №8. С. 36–45.
17. Горбовец М.А., Беляев М.С., Ходинев И.А. Методика испытаний на скорость роста трещины усталости нового жаропрочного интерметаллидного титанового сплава / В сб. материалов конф. «ТестМат–2012». М.: ВИАМ, 2012 (CD-диск).
18. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Способ обработки результатов испытаний образцов на скорость роста трещины при постоянной амплитуде нагружения // *Вестник Московского авиационного института*. 2012. Т. 19. №6. С. 94–100.
19. Терентьев В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов: учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 2001. 61 с.
20. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws // *Journal of Basic Engineering (Trans. ASME)*. 1963. №12. P. 528–534.
21. Голубовский Е.Р., Волков М.Е., Эмаусский Н.М. Оценка скорости развития трещины усталости в никелевых сплавах для дисков ГТД // *Вестник двигателестроения*. 2013. №2. С. 229–235.
22. Korsunsky A.V., Dini D.D., Walsh M.J. Fatigue crack growth rate analysis in a titanium alloy // *Key Engineering Materials Vols.* 2008. V. 385–387. P. 5–8.
23. Niccolls E.H. A correlation for fatigue crack growth rate // *Scripta Metallurgica*. 1976. V. 10. №4. P. 295–298.
24. Tanaka K., Matsuoka S. A tentative explanation for two parameters,  $C$  and  $m$ , in Paris equation of fatigue crack growth // *Int. Journal of Fracture*. 1977. V. 13. №5. P. 563–584.
25. Туманов Н.В. Кинетическое уравнение устойчивого роста трещин малоциклового усталости // *Вестник СГАУ*. 2014. №5 (47). Ч. 1. С. 18–26.
26. Потапов С.Д., Перепелица Д.Д. Исследование циклической скорости роста трещин в материалах основных деталей авиационных ГТД // *Технология легких сплавов*. 2013. №2. С. 5–19.
27. Kumar V., Nagalaxmi G. Fatigue Crack Growth Behavior of a near  $\alpha$  IMI-834 Titanium Alloy at Elevated Temperature // *Engineering Fracture Mechanics*. 2001. №68. P. 129–147.
28. Boyce B.L., Ritchie R.O. Effect of load ratio and maximum stress intensity on the fatigue threshold in Ti–6Al–4V // *Engineering Fracture Mechanics*. 2001. V. 68. №2. P. 129–147.
29. Oberwinkler B. Modeling the fatigue crack growth behavior of Ti–6Al–4V by considering grain size and stress ratio // *Materials Science and Engineering A*. 2011. V. 528. P. 5983–5992.
30. Sansoz F., Ghonem H. Effects of loading frequency on fatigue crack growth mechanisms in  $\alpha/\beta$  Ti microstructure with large colony size // *Materials Science and Engineering: A*. 2003. V. 356. №1–2. P. 81–92.
31. Bache M.R. A review of dwell sensitive fatigue in titanium alloys: the role of microstructure, texture and operating conditions // *International Journal of Fatigue*. 2003. №25 (9). P. 1079–1087.