

М.А. Горбовец<sup>1</sup>, М.С. Беляев<sup>1</sup>, И.А. Ходинев<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ РОСТА ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ В ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОМ ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ

*Особый интерес для авиационного двигателестроения представляют титановые сплавы с рабочими температурами выше 550°C. Одними из наиболее перспективных являются интерметаллидные титановые орто-сплавы.*

*В работе исследованы штамповки из нового жаропрочного интерметаллидного (орто) титанового сплава на основе соединения  $Ti_2NbAl$  с пластинчато-глобулярной структурой.*

*Исследования СРТУ сплава проводили при рабочих температурах: 20, 600 и 650°C. Показано, что изменение температуры значительно влияет на сопротивление сплава распространению трещины.*

**Ключевые слова:** усталость, скорость роста трещины, СРТУ, цикл нагружения, трещина, уравнение Периса, коэффициент интенсивности напряжения, КИН, титановый сплав, интерметаллид.

М.А. Gorbovets<sup>1</sup>, М.С. Belyaev<sup>1</sup>, I.A. Khodinev<sup>1</sup>

## AN INFLUENCE OF OPERATING TEMPERATURE ON FATIGUE CRACK GROWTH RATE FOR INTERMETALLIC TITANIUM ALLOY

*Titanium alloys with operating temperatures higher than 550°C are very attractive for application in aircraft engines. Intermetallic alloys based on orthorhombic titanium aluminide are most promising of them.*

*Forgings made of a new intermetallic alloy based on orthorhombic titanium aluminide ( $Ti_2NbAl$ ) with laminar-globular structure were investigated in this work.*

*FCGR was studied at three temperatures: 20, 600 and 650°C. It was shown that the temperature variations had a noticeable influence on FCGR.*

**Key words:** fatigue, crack growth rate, FCGR, cycle of load, crack, Paris curve, stress intensity factor, titanium alloy, intermetallic 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

Скорость роста трещины усталости (СРТУ) является необходимой составляющей в комплексе механических свойств, характеризующем надежность материалов для авиационной техники [1–3]. Действующие требования предусматривают ее обязательное определение для материалов основных деталей авиационного двигателя.

Применение титановых сплавов с рабочими температурами >550°C позволит резко увеличить эффективность двигателя, что является первостепенной задачей при разработке двигателей нового поколения. Создание материалов на основе интерметаллидов титана, в первую очередь на базе алюминидов, является актуальной задачей [4–8]. Основными направлениями в создании таких материалов стали сплавы на основе  $Ti_3Al$  (супер  $\alpha_2$ -сплавы),  $TiAl$  ( $\gamma$ -сплавы) и  $Ti_2NbAl$  (орто-сплавы) [4–9]. Однако современные супер  $\alpha_2$ - и  $\gamma$ -сплавы не удовлетворяют конструкторским требованиям из-за низких механических свойств [10, 11]. В работах [6–10, 12, 13] авторами отмечен более высокий уровень механических свойств интерметаллидных орто-сплавов: прочности, пластично-

сти и жаропрочности, вязкости разрушения и пожаробезопасности до температуры 700°C. Повышенная технологичность этих сплавов при горячей обработке давлением позволяет изготавливать различные виды деформированных полуфабрикатов (плиты, штамповки, листы и др.) с лучшим уровнем механических свойств, чем у  $\alpha_2$ - и  $\gamma$ -сплавов. Несмотря на преимущества, орто-сплавам свойственны и недостатки: сложность при металлургическом производстве, повышенные плотность и стоимость [6, 11, 12, 14–16].

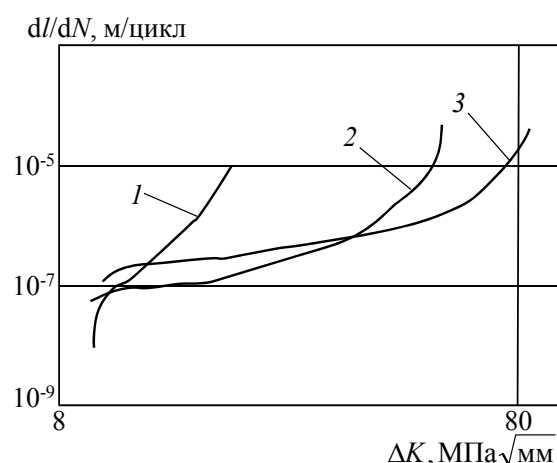
Для исследования СРТУ выбраны штамповки из нового жаропрочного интерметаллидного (орто) титанового сплава на основе соединения  $Ti_2NbAl$ , полученные из литых заготовок, подвергнутых свободной ковке на промежуточные заготовки и последующей изотермической штамповке, после чего следовала стандартная упрочняющая термическая обработка. В результате этих операций штамповки имели глобулярно-пластинчатую микроструктуру с размером зерна 50–60 мкм, сферическими выделениями  $\alpha_2$ -фазы (3–5 мкм) и пластинчатыми выделениями орто-фазы шириной  $\sim 5$  мкм и длиной до 20–25 мкм. Температуры испытания выбраны исходя из области применения сплава и составили 20, 600 и 650°C.

Испытания на СРТУ проведены по методике, соответствующей требованиям стандарта ASTM E647 и РД 50-345–82 [17]. Испытания проводили на компактных образцах типа «СТ» с базовым размером  $W=50$  мм, толщиной  $B=10$  мм и прямым надрезом, выполненном электроискровым способом (радиус в вершине надреза  $r_n=0,2$  мм), при внецентренном растяжении на сервогидравлической испытательной машине «Schenck PSB25». Частота нагружения  $f$  при испытании составляла 15 Гц, коэффициент асимметрии цикла нагружения  $R=0,1$ . Длину трещины измеряли методом податливости при помощи датчика раскрытия трещины фирмы «Schenck». Управление испытанием и сбор данных осуществлялись при помощи компьютера со специализированным программным обеспечением.

Испытание начиналось с выращивания предварительной трещины при комнатной температуре при постоянной частоте и коэффициенте асимметрии, размах коэффициента интенсивности напряжений ( $\Delta K$ ) уменьшался ступенчато с увеличением длины трещины. Нанесение трещины начинали при  $\Delta K=12,7$  МПа $\sqrt{\text{мм}}$  и заканчивали – при 9 МПа $\sqrt{\text{мм}}$  до достижения общего приращения длины нанесенной трещины 1,5–2 мм. Для всех испытанных образцов исходная трещина была расположена в плоскости, перпендикулярной направлению действия приложенной нагрузки, и имела одинаковую длину по фронту развития. Далее проводили испытания образца с нанесенной трещиной при температурах 20, 600 и 650°C. Поддерживали постоянный размах нагрузки  $\Delta P$ , величина которой превышала приложенную на завершающем этапе нанесения исходной трещины. Начальная величина размаха коэффициента интенсивности напряжений составляла  $\Delta K=9,5$  МПа $\sqrt{\text{мм}}$  и постоянно увеличивалась в процессе испытаний вследствие роста трещины усталости.

Анализируя характер макроразрушения, установлено, что процесс разрушения идет строго в направлении от вершины надреза вглубь образца. В целом поверхность разрушения имеет плоский характер и располагается перпендикулярно направлению действия приложенной нагрузки. По траектории продвижения трещины усталости отсутствуют выпучивания, сужающие сечение образца перед фронтом трещины и искажающие результаты испытаний, что говорит о корректности проведения испытания.

По результатам испытаний построены кинетические диаграммы усталостного разрушения [18], по которым определяли СРТУ. Диаграммы строили, используя программное обеспечение фирмы «Schenck». Схематизированные диаграммы для температур испытания 20, 600 и 650°C приведены на рисунке.



Схематизированная кинетическая диаграмма усталостного разрушения титанового сплава на основе соединения  $Ti_2NbAl$  для температур испытания 20 (1), 600 (2) и 650°C (3)

Как видно из диаграммы, СРТУ для всех температур находятся в интервале  $10^{-8}$ – $10^{-5}$  м/цикл. Значения коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  при температуре испытания 20°C существенно ниже, чем при температурах 600 и 650°C. Заметна тенденция: с увеличением температуры уменьшается тангенс угла наклона линейного участка и увеличивается интервал  $\Delta K$  между началом и концом этого участка. Если сравнивать результаты при температурах 600 и 650°C, то видно, что в интервале  $\Delta K$  от 10 до 35 МПа $\sqrt{мм}$  скорость роста трещины при более высокой температуре несколько выше (~3 раза), хотя начиная с 35 МПа $\sqrt{мм}$  при 600°C скорости становятся на порядок выше, чем при 650°C. Численные результаты испытаний для *линейных участков* диаграмм приведены в таблице.

**Результаты испытаний на скорость роста трещины усталости (СРТУ)  
жаропрочного интерметаллидного титанового сплава на основе  $Ti_2NbAl$**

$\Delta K$ , МПа $\sqrt{мм}$	СРТУ: $dl/dN \cdot 10^6$ , м/цикл, при температуре испытания, °C		
	20	600	650
10,5	0,096	–	–
12,5	0,292	–	–
13,5	0,451	–	–
21	–	0,202	–
31	–	0,583	0,519
41	–	1,26	0,778
62	–	–	1,367

По результатам исследования можно сделать вывод, что при высоких рабочих температурах интерметаллидный жаропрочный титановый орто-сплав на основе  $Ti_2NbAl$  характеризуется более высоким сопротивлением распространению трещины усталости, чем при комнатной температуре. Аналогичные зависимости приведены в работе Германского аэрокосмического центра (DLR) для сплава того же класса [13]. Такая температурная зависимость резко отличается от никелевых сплавов, где ситуация обратная.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И.А., Балашов Б.Ф., Дульнев Р.А. и др. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение. 1981. 222 с.
2. 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.

3. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 387–393.
4. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
5. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
6. Ночовная Н.А., Иванов В.И. Интерметаллиды на основе титана (Анализ состояния вопроса) //Титан. 2007. №1. С. 44–48.
7. 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.
8. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Павлова Т.В., Иванов В.И. Жаропрочные титановые сплавы //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №3 С. 7–8.
9. Иванов В.И., Ночовная Н.А. Перспективные жаропрочные материалы на основе алюминидов титана /В сб. Труды Международной науч.-технич. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение». М.: ВИАМ. 2006. С. 98–103.
10. Иванов В.И., Ясинский К.К. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов  $Ti_3Al$  и  $TiAl$  для работы при температурах 600–800°C в авиакосмической технике //Технология легких сплавов. 1996. №3. С. 63–68.
11. Ночовная Н.А. Перспективы и проблемы применения титановых сплавов /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. Перспективы развития и применения титановых сплавов для самолетов, ракет, двигателей и судов. М.: ВИАМ. 2007. С. 4–8.
12. 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. №S. С. 196–206.
13. Kumpfert J. Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide //Advanced Engineering Materials. 2001. V. 3. №11. P. 851–864.
14. Kumpfert J., Leyens C. Orthorhombic Titanium Aluminides: Intermetallic with Improved Damage Tolerance /In: Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Application. Willey-VCH, GmbH & Co. KGaA, Wienheim. 2003. P. 59–88.
15. Appel F., Oehring M.  $\gamma$ -Titanium Aluminide alloys: Alloys Design and Properties /In: Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Application. Willey-VCH, GmbH & Co. KGaA, Wienheim. 2003. P. 89–152.
16. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Ясинский К.К., Кочетков А.С. Специфика плавки и способы получения слитков интерметаллидных титановых сплавов с повышенным содержанием ниобия //Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №SP2. С. 53–59.
17. Горбовец М.А., Беляев М.С., Ходинев И.А. Методика испытаний на скорость роста трещины усталости нового жаропрочного интерметаллидного титанового сплава //ТестМат-2012: Материалы конференции. М. ВИАМ. 2012.
18. Терентьев В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов: Учебное пособие. Новосибирск: НГТУ. 2001. 61 с.

## REFERENS LIST

1. Birger I.A., Balashov B.F., Dul'nev R.A. i dr. Konstrukcionnaja prochnost' materialov i detalej gazoturbinnih dvigatelej [Constructional durability of materials and details of gas-turbine engines]. M.: Mashinostroenie. 1981. 222 s.
2. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shnejderovich R.M. Nesushhaja sposobnost' i raschet detalej mashin na prochnost' [Bearing ability and calculation of details of machines on durability]: Rukovodstvo i spravochnoe posobie. M.: Mashinostroe-nie. 1975. 488 s.
3. Orlov M.R. Strategicheskie napravlenija razvitija Ispytatel'nogo centra FGUP «VIAM» [Strategic directions of development of the Test center Federal State Unitary Enterprise VIAM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 387–393.
4. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
5. Antipov V.V. Strategija razvitija titanovyh, magnievych, berillievych i aljuminievych splavov [Strategy of development of titanic, magnesium, beryllium and aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 157–167.
6. Nochovnaja N.A., Ivanov V.I. Intermetallidy na osnove titana (Analiz sostojanija voprosa) [Intermetallic on the basis of the titan (The analysis of a condition of a question)] //Titan. 2007. №1. S. 44–48.
7. Antashev V.G., Nochovnaja N.A. Sovremennoe sostojanie i tendencii razvitija issledovanij v oblasti titanovyh splavov [Current status and trends of research in titanium alloys] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2008. №3. S. 24–27.
8. Antashev V.G., Nochovnaja N.A., Pavlova T.V., Ivanov V.I. Zharoprochnye titanovye splavy [Heat resisting titanic alloys] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2007. №3 S. 7–8.
9. Ivanov V.I., Nochovnaja N.A. Perspektivnye zharoprochnye materialy na osnove aljuminidov titana [Perspective heat resisting materials on a basis aluminide the titan] /V sb. Trudy Mezhdunarodnoj nauch.-tehnič. konf. «Nauchnye idei S.T. Kishkina i sovremennoe materialovedenie». M.: VIAM. 2006. S. 98–103.
10. Ivanov V.I., Jasinskij K.K. Jeffektivnost' primenenija zharoprochnyh splavov na osnove intermetallidov  $Ti_3Al$  i  $TiAl$  dlja raboty pri temperaturah 600–800°C v aviakosmicheskoj tehnikе [Efficiency of application of heat resisting alloys on a basis intermetallic  $Ti_3Al$  and  $TiAl$  for work at temperatures of 600–800°C in aerospace equipment] //Tehnologija legkih splavov. 1996. №3. S. 63–68.
11. Nochovnaja N.A. Perspektivy i problemy primenenija titanovyh splavov [Prospects and problems of application of titanium alloys] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. Perspektivy razvitija i primenenija titanovyh splavov dlja samoletov, raket, dvigatelej i sudov. M.: VIAM. 2007. S. 4–8.
12. Nochovnaja N.A., Ivanov V.I., Alekseev E.B., Kochetkov A.S. Puti optimizacii jekspluatacionnyh svojstv splavov na osnove intermetallidov titana [Ways of optimization of operational properties of alloys on a basis intermetallic the titan] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 196–206.
13. Kumpfert J. Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide [Intermetallic Alloys Based on Orthorhombic Titanium Aluminide] //Advanced Engineering Materials. 2001. V. 3. №11. R. 851–864.
14. Kumpfert J., Leyens C. Orthorhombic Titanium Aluminides: Intermetallic with Improved Damage Tolerance /In: Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Application. Willey-VCH, GmbH & Co. KGaA, Wienheim. 2003. P. 59–88.
15. Appel F., Oehring M.  $\gamma$ -Titanium Aluminide alloys: Alloys Design and Propereties /In: Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Application. Willey-VCH, GmbH & Co. KGaA, Wienheim. 2003. P. 89–152.
16. Nochovnaja N.A., Alekseev E.B., Jasinskij K.K., Kochetkov A.S. Specifika plavki i sposoby poluchenija slitkov intermetallidnyh titanovyh splavov s povyshennym sodержaniem niobija [Specificity of melting and ways of receiving ingots of intermetallic titanic alloys with the raised content of niobium] //Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. N.Je. Baamana. Ser. Mashinostroenie. 2011. №SP2. S. 53–59.

17. Gorbovec M.A., Beljaev M.S., Hodinev I.A. Metodika ispytanij na skorost' rosta treshhiny ustalosti novogo zharoprochnogo intermetallidnogo titanovogo splava [Methods of tests for the growth rate of a crack of fatigue of a new heat resisting intermetallic titanic alloy] //TestMat-2012: Materialy konferencii. M. VIAM. 2012.
18. Terent'ev V.F. Ciklicheskaja prochnost' metallicheskih materialov [Cyclic durability of metal materials]: Uchebnoe posobie. Novosibirsk: NGTU. 2001. 61 s.