

Научная статья

УДК 669.018.44:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-51-67

ВЛИЯНИЕ МАКРОВОЛОКНА НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА КОЛЕЦ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Ti–Al–Sn–Zr–Mo–V–Nb–Fe–Si–(O–C) МАРКИ VT46

О.С. Кашапов¹, А.Р. Кондратьева¹, С.А. Монин¹, В.С. Калашников¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Исследованы усталостные свойства и трещиностойкость цельнокатанных колец из титанового сплава VT46 для авиационных двигателей. Установлено влияние макроструктурной неоднородности и направления макроволокна на механические характеристики. Показано, что при общей стабильности прочностных свойств наблюдается анизотропия усталостной долговечности и параметров роста трещин. Определены пороговые значения коэффициента интенсивности напряжений и оценены критические размеры дефектов. Сделан вывод о необходимости совершенствования технологии раскатки для повышения однородности структуры.

Ключевые слова: титановые сплавы, кольца, раскатка, макроструктура, усталостная долговечность, трещиностойкость, макроволокно, анизотропия

Для цитирования: Кашапов О.С., Кондратьева А.Р., Монин С.А., Калашников В.С. Влияние макроволокна на усталостные свойства колец из жаропрочного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Mo–V–Nb–Fe–Si–(O–C) марки VT46 // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 51–67. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-51-67.

Scientific article

INFLUENCE OF MACROFIBER ORIENTATION ON THE FATIGUE PROPERTIES OF RINGS MADE OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOY OF THE Ti–Al–Sn–Zr–Mo–V–Nb–Fe–Si–(O–C) SYSTEM (grade VT46)

O.S. Kashapov¹, A.R. Kondratyeva¹, S.A. Monin¹, V.S. Kalashnikov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The fatigue properties and crack resistance of solid-rolled rings made of VT46 titanium alloy were investigated. The influence of macrostructure inhomogeneity and microfiber orientation on mechanical properties was established. It was shown that despite the overall stability of strength properties, anisotropy of fatigue life and crack growth parameters is observed. There were determined threshold stress intensity factors, and were estimated critical defect sizes. It is necessary to enhance the rolling technology to improve structural homogeneity.

Keywords: titanium alloys, gas turbine engine rings, hot rolling, macrostructure, fatigue life, fracture toughness, macro texture, anisotropy

For citation: Kashapov O.S., Kondratyeva A.R., Monin S.A., Kalashnikov V.S. Influence of macrofiber orientation on the fatigue properties of rings made of heat-resistant titanium alloy of the Ti–Al–Sn–Zr–Mo–V–Nb–Fe–Si–(O–C) system (grade VT46). *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 51–67. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-51-67.

Введение

Титановые сплавы занимают ключевое место среди конструкционных материалов для авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) благодаря уникальному сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и способности работать при повышенных температурах [1]. Важное значение имеют кольцевые корпусные (статорные) элементы двигателя из титановых сплавов, применяемые в конструкции компрессоров, уплотнительных системах и несущих конструкциях двигателя [2]. Условия эксплуатации таких деталей характеризуются сочетанием высоких температур, циклических механических нагрузок, окислительных сред и строгих требований к размерной стабильности, что определяет необходимость комплексного подхода к выбору материалов, проектированию и технологиям производства [3–5]. Конструкционные элементы в виде колец в ГТД выполняют несколько функций, среди которых наиболее важной областью применения является уплотнение зазоров для предотвращения утечки газов между различными ступенями двигателя. В частности, широкое распространение получили W-образные металлические уплотнения, которые обеспечивают необходимую упругость конструкции и компенсацию термических деформаций [6]. В работах [6–8] и отечественных конструкторов показано, что эксплуатационная надежность таких уплотнительных элементов напрямую влияет на ресурс двигателя и безопасность полетов. При этом кольца работают в условиях высокотемпературного газового потока и циклических нагрузок, что приводит к необходимости проведения анализа усталостной долговечности. Применение конечно-элементного анализа позволяет оценить распределение напряжений и прогнозировать механическое поведение уплотнительных элементов [6]. Дополнительные исследования показали, что геометрическая оптимизация конструкции (в частности изменение угла раскрытия внешних элементов W-образного профиля) может существенно улучшить ее жесткость и повысить герметичность соединений [7]. Помимо уплотнительных функций, титановые кольца широко применяются как силовые элементы конструкций компрессоров. Они формируют сложные кольцевые сборочные единицы типа «блингов», которые в основном изготавливают из поковок [9]. В отечественной практике до настоящего времени применяют сборно-разборные конструкции с механическим креплением лопаток направляющего аппарата, при этом корпуса выполнены из цельнокатаных или сварных колец. С учетом существенно возросшего ресурса двигателей к таким элементам стали предъявлять высокие требования по прочности, в том числе к сопротивлению усталости, а также к однородности макро- и микроструктуры по сечению полуфабриката.

Выбор титанового сплава определяется температурой эксплуатации, уровнем механических нагрузок, требованиями к сопротивлению усталости и технологичности самого сплава [10, 11]. За рубежом наиболее распространенным в авиационной промышленности остается сплав Ti-6Al-4V, который составляет значительную долю от применяемых титановых сплавов преимущественно для компрессоров низкого давления, где рабочие температуры не превышают ~300 °C [12, 13]. В отечественном двигателестроении к таким материалам относятся сплавы ВТ6, ОТ4, ОТ4-1 и ВТ3-1. Для более умеренных температур за рубежом используются псевдо- α -сплавы, такие как Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (Ti-6242, США), Ti-8Al-1Mo-1V (Ti-811, США), или двухфазный ($\alpha + \beta$)-сплав Ti6246 [12, 14–16], а также перспективные высокопрочные near- β -титановые сплавы [17, 18]. Для максимальных температур (вплоть до 600 °C) используют псевдо- α -титановые сплавы IMI 834 и Ti-1100 [13, 16]. Среди отечественных сплавов для наружных корпусов компрессора чаще применяется псевдо- α -сплав ВТ20, а также двухфазные жаропрочные титановые сплавы ВТ8 и ВТ9 при температурах до 450–500 °C, для более высоких температур – псевдо- α -сплавы ВТ18У и ВТ41. Эти сплавы

обладают высоким пределом ползучести, высокими механическими свойствами при повышенных температурах и сопротивлением усталости. Благодаря этим особенностям такие материалы широко применяются при изготовлении деталей, в том числе колец, для ступеней компрессоров высокого давления [9, 13, 16]. В отдельную категорию следует выделить интерметаллидные сплавы γ -TiAl, которые рассматриваются как материалы нового поколения для горячих секций двигателей. Они обладают высокой удельной прочностью, хорошей стойкостью к окислению и ползучести, однако характеризуются ограниченной пластичностью при комнатной температуре [19–21].

При производстве колец из титановых сплавов требуется применение специализированных технологий, обеспечивающих точность размеров и требуемые механические свойства. Одна из наиболее перспективных технологий – Tru-Form, позволяющая получать кольца большой осевой ширины в виде цельных заготовок. С помощью этой технологии значительно сокращается объем механической обработки и повышается точность геометрических размеров [22]. Выбор технологии зависит от требований к форме изделия, допускам и механическим характеристикам [9, 10]. В последние годы активно развиваются аддитивные технологии производства, позволяющие получать сложные конструкции без применения традиционной оснастки. Эти технологии позволяют снизить массу конструкций и повысить эффективность двигателей [23], а циклические термические нагрузки в процессе аддитивного производства могут приводить к формированию более стабильной и однородной микроструктуры [24]. К современным способам получения кольцевых заготовок следует также отнести многослойную горячую компрессионную сварку [25], высокоэффективные процессы формообразования [26], безоправочную горячую раскатку [27], а для повышения эксплуатационных свойств деталей ГТД – методы электроspark-упрочнения и поверхностного модифицирования [28]. Тем не менее новые технологические решения для получения кольцевых заготовок не могут сравниться по бездефектности материала с традиционными способами получения заготовок методами горячей деформации. С этой же точки зрения для ресурсных изделий отдается предпочтение цельнокатаным или цельноштампованным кольцам, а не сварным.

Горячая раскатка колец – наиболее рациональный метод изготовления. Типичный технологический процесс изготовления таких колец предполагает постепенную горячую прокатку на специальных станах подготовленной кованой или штампованной заготовки с отверстием [29]. В процессе раскатки происходит постепенное формирование будущего профиля кольца между ведущим и опорными валками, которое из-за ограничения возможностей кольцераскатных станов имеет достаточно массивную форму по сравнению с кольцами, полученными по технологии Tru-Form [30]. При этом в процессе деформации производится контроль скорости вращения кольца, температуры в начале и в процессе деформации заготовки, коэффициента подачи и ширины оправки [31]. Именно эти параметры на завершающей стадии изготовления колец отвечают за определенное направление вытянутого макроволокна, которое, в свою очередь, является косвенным показателем наличия металлографической текстуры и одним из ключевых факторов, определяющих степень анизотропии механических свойств готовых колец.

Известно, что макроструктурная неоднородность предполагает наличие анизотропии механических свойств, характеристик механических свойств при растяжении и усталостной долговечности [32, 33]. Формирование макроструктуры и кристаллографической текстуры полуфабриката обусловлено в том числе особенностями гексагональной решетки α -фазы в титановых сплавах, имеющей ограниченное количество систем скольжения, так что важное значение в деформации имеет двойникование [34]. Осуществление многопроходной всесторонней ковки способствует измельчению

макрозерна и улучшению прочностных характеристик [35, 36], равно как и снижению анизотропии свойств [37]. Эти операции проводят, как правило, только на стадии первичнойковки слитков. Такие процессы позволяют получать материал с определенным уровнем качества, однако усталость, скорость роста усталостной трещины и прочность материала цельнокатаных колец, имеющих выраженную макроструктурную неоднородность в разных направлениях, не вполне изучены [38, 39]. Кольца в компрессорах работают в условиях сложного сочетания ползучести, усталостного воздействия и влияния окружающей среды. В работе [40] показано, что при высоких температурах существенное значение для развития трещин имеют процессы ползучести и окисления, а кристаллографическая текстура влияет на распространение усталостных трещин и устойчивость к разрушению [32, 33, 38]. Помимо проблем, касающихся свойств самого сплава, существует ряд технологических трудностей, возникающих при прокатке колец, среди которых существенным (помимо дефектов в результате деформации и их исключения) является неоднородное поле напряжений [41], приводящее к неоднородной проработке материала. В поверхностных и приповерхностных слоях деформированного кольца возникает трехосное напряженное состояние сжатия, в среднем слое наблюдается одноосное сжатие и двухосное растяжение, а положение максимальных напряжений зависит от распределения подачи за оборот в процессе раскатки [41].

Современные исследования во многом сосредоточены на разработке новых титановых сплавов с повышенными температурами эксплуатации и внедрении аддитивных технологий. Одновременно с этим на начальных этапах двигателя конструируются с помощью численного моделирования в CAD/CAM-системах, в которых необходимо закладывать параметры анизотропии свойств в тех или иных деталях. Так, для разработки конструкций современных двигателей широкое распространение получило внедрение цифровых двойников, разработку которых в настоящее время регламентирует ПНСТ 928–2024 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники авиационных газотурбинных двигателей. Общие положения». В них также должны учитываться как структурные параметры материала, так и связанная с этим анизотропия свойств, а также возможная дефектность структуры и ее влияние на ресурс [42].

Цель данной работы – исследование малоциклового усталости и трещиностойкости (скорости роста трещины усталости – СРТУ) цельнокатаных колец из нового высокопрочного жаропрочного псевдо- α -сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Mo–V–Nb–Fe–Si–(O–C) марки ВТ46 разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [43] в зависимости от направления макроволокну в конечном полуфабрикате.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

Выплавку слитка и изготовление колец проводили на промышленном оборудовании ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА». Для изготовления колец методом тройного вакуумно-дугового переплава выплавлен слиток сплава марки ВТ46 состава Ti–6Al–2Mo–2Zr–3Sn–Nb–V–(Si–Fe–C–O) диаметром 840 мм и массой 3,7 т. Ковку слитка проводили с понижением температур нагрева в однофазной β -области, изготовление кованого прутка (с промежуточным размером) – кузнечной протяжкой на прессах при температурах двухфазной области с однократной полной перекристаллизацией в однофазной β -области. Величина суммарного укова при деформации в β -области составила не менее 4,2, в $(\alpha + \beta)$ -области – не менее 4,9. В данной работе под уковом понимается отношение начального и конечного квадрата площадей деформируемой заготовки. Далее деформацию мерных заготовок проводили осадкой в торец и раскаткой при температурах двухфазной области. При этом уков при осадке заготовки составил 5,2,

при раскатке на стане с учетом завершающей операции профилирования 1,7. Общий вид изменения заготовки от исходной до профилированного кольца и направление воздействия деформирующей силы при изготовлении представлены на рис. 1. Термическая обработка для колец из сплава ВТ46 заключалась в двухступенчатом отжиге – типовом режиме термической обработки для жаропрочных титановых сплавов.



Рис. 1. Изменение внешнего вида исходной заготовки до конечного кольца из сплава марки ВТ46

Исследования макроструктуры осуществляли на макротемплетах без использования специальных технических средств в состоянии после травления в водном растворе Кролля на основе фтористоводородной и азотной кислот. Анализ микроструктуры проводили при помощи оптического металлографического микроскопа с увеличением до $\times 1200$ на травленных микрошлифах.

В данной работе в качестве основных свойств колец (без привязки к макроволокну) представлены результаты испытаний при комнатной температуре на растяжение и ударную вязкость. Испытания на растяжение проводили на образцах с рабочей частью 5 мм на оборудовании и по методике из ГОСТ 1497–2023. Испытания на ударную вязкость проводили на образцах сечением 100 мм^2 с концентратором вида U на оборудовании и по методике из ГОСТ 9454–78. Общее количество образцов для испытаний на прочность и ударную вязкость составило по 5 шт. на каждый вид испытания.

Направления вырезки образцов и профиль цельнокатаного кольца из сплава ВТ46 представлены на рис. 2.

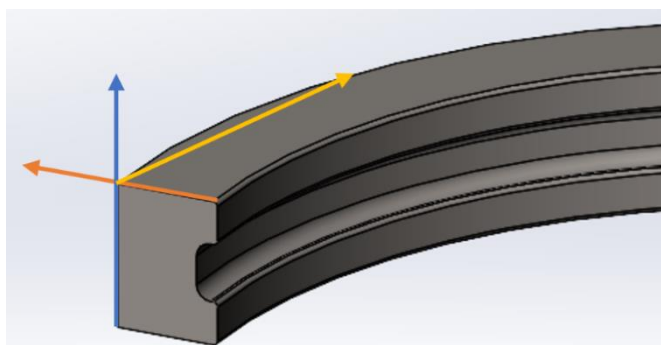


Рис. 2. Профиль цельнокатаного кольца из сплава ВТ46 и направления вырезки образцов: желтая стрелка – хордовое (тангенциальное), синяя стрелка – высотное, оранжевая стрелка – радиальное

Испытания на малоцикловую усталость проводили на оборудовании и по методике ГОСТ 25.502–78 на цилиндрических образцах с гладкой рабочей частью $\varnothing 5 \text{ мм}$

при частоте нагружения $f = 1$ Гц, коэффициенте асимметрии цикла $R = 0$, в «мягком» цикле нагружения по схеме растяжения. Образцы для испытаний на малоцикловую усталость ориентировали во всех трех направлениях, как показано на рис. 2. Многоцикловую усталость определяли на образцах, вырезанных в хордовом направлении, с диаметром рабочей части 7,5 мм при частоте нагружения $f = 50$ Гц, коэффициенте асимметрии цикла $R = -1$ по схеме «чистый изгиб» по методике ГОСТ 25.502–78.

Испытания на СРТУ проводили на оборудовании и по методике ОСТ 1 92127–90 и ASTM E-399 с определением пороговых значений коэффициента интенсивности напряжений. Образцы для испытаний ориентированы во всех трех направлениях, которые указаны на рис. 2, таким образом, чтобы трещина распространялась соответственно в радиальном, высотном и хордовом направлениях.

Для оценки макроструктуры использовали универсальную 10-балльную шкалу ГОСТ 26492–85 «Прутки катаные из титана и титановых сплавов».

Результаты испытаний

Для оценки волокна и однородности макроструктуры колец подготовлены темплеты в радиальном и высотном сечениях так, что в область исследуемой плоскости темплетов попали все три направления последующей вырезки образцов для проведения испытаний на усталостную долговечность и трещиностойкость. Макроструктуры колец в радиальном и высотном направлениях представлены на рис. 3.

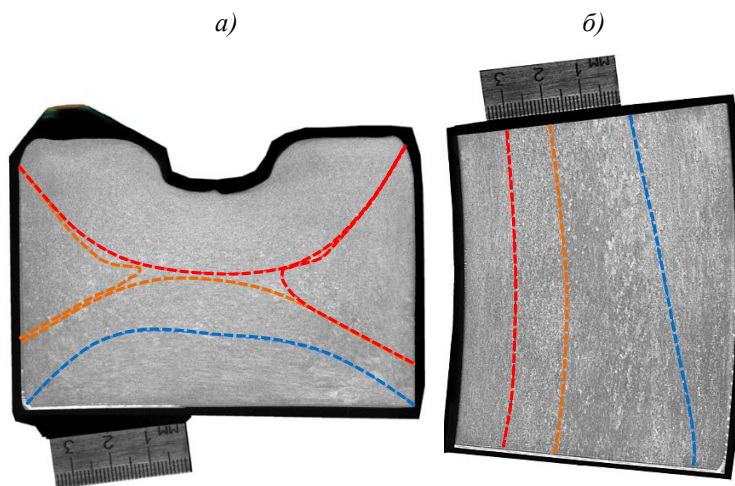


Рис. 3. Макроструктуры кольца из сплава ВТ46 в высотном (а) и радиальном (б) направлениях

Макроструктуры колец имеют матовую тональность без блестящих зерен и представлены в обеих плоскостях преимущественно зерном 4–6 балла с ярко выраженной ориентацией перпендикулярно действующим в процессе раскатки силам, что также свидетельствует о неоднородности напряженного состояния в процессе прокатки, как представлено в работе [41]. На рис. 3 пунктирными линиями отмечены области макроструктуры с отличающимися по балльности областями, при этом цвет линий означает области: где прошло наиболее сильное измельчение зерна (красные), менее сильное (оранжевые) и с явно выраженной волокнистой макроструктурой (синие).

Микроструктуры колец представлены на рис. 4 в радиальном, хордовом и высотном направлениях. Во всех трех направлениях микроструктура характеризуется наличием утолщенной межфазной границы между пластинчатыми колониями вторичной α -фазы и β -фазой и объемной долей первичной α -фазы на уровне 25 %.

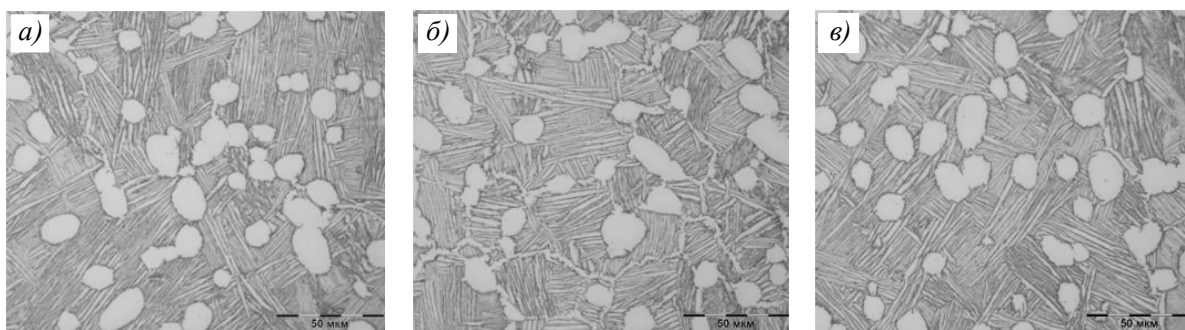


Рис. 4. Микроструктуры колец в радиальном (а), хордовом (б) и высотном (в) направлениях

На рис. 5 представлены средние значения по результатам испытаний на растяжение и ударную вязкость образцов, вырезанных из центральной части кольца и на периферии и ориентированных в хордовом направлении.

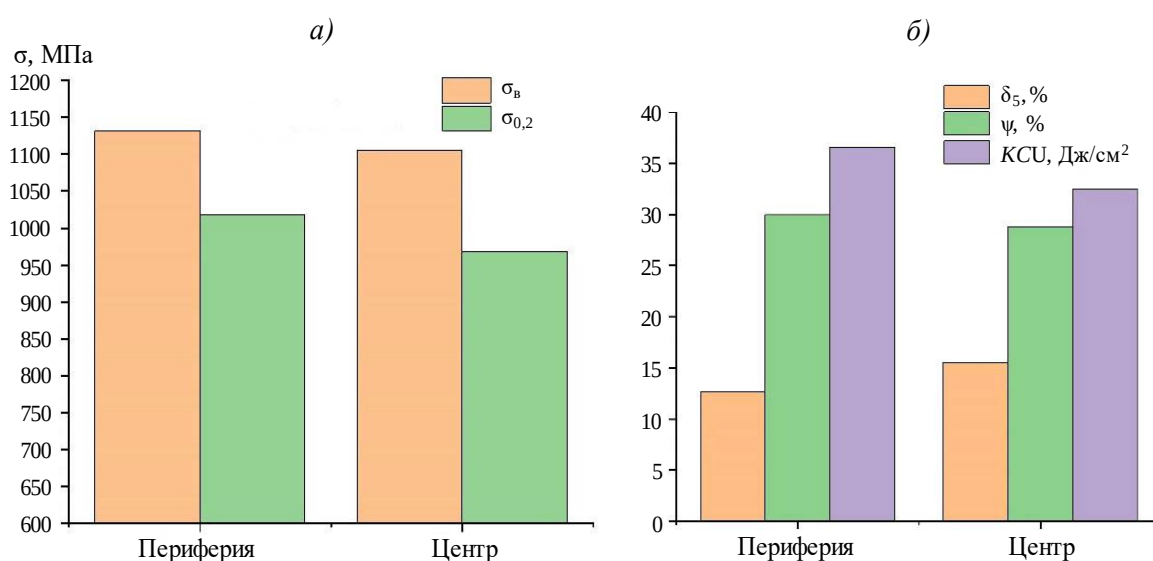


Рис. 5. Средние значения характеристик прочности (а), пластичности и ударной вязкости (б) материала колец из сплава ВТ46 в центральной части и на периферии в хордовом направлении

Результаты испытаний показывают, что существенные колебания по уровню механических свойств на периферии и в центре отсутствуют, однако следует отметить, что свойства образцов, вырезанных из периферийной части кольца, имеют несколько больший уровень прочности и ударной вязкости по сравнению с образцами из центральной части при практически одинаковом уровне пластичности.

На рис. 6 приведены результаты испытаний на малоцикловую усталость гладких цилиндрических образцов на базе 10^4 циклов. Все испытанные образцы в результате испытаний были разрушены.

На рис. 6 также отмечена область 95%-ной доверительной вероятности для аппроксимирующей кривой. Следует отметить, что, хотя и имеется незначительное отличие между пределами выносливости для трех направлений, в совокупности уровень усталостной долговечности составляет 1050 МПа с доверительной вероятностью 50 % в соответствии с ГОСТ 25.502–78. Область значений для всего объема испытанных образцов с учетом разброса для каждого уровня напряжений отмечена на рис. 6 черными пунктирными линиями.

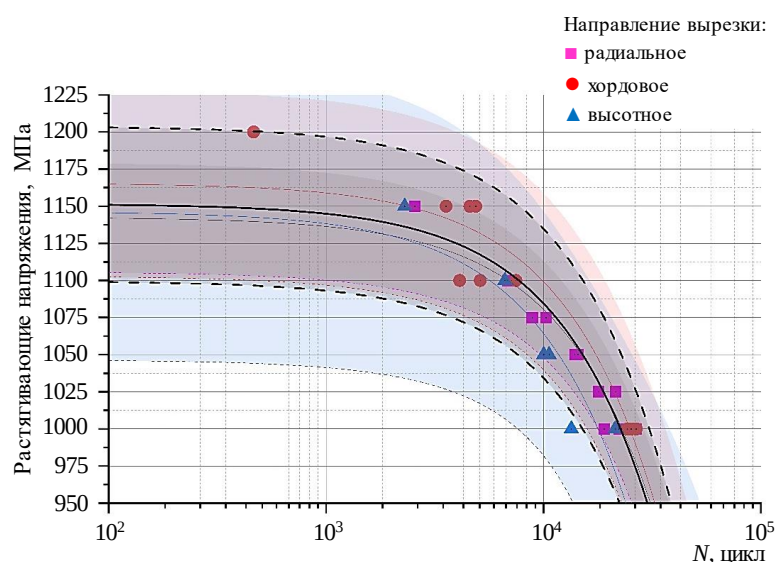


Рис. 6. Результаты испытаний на малоцикловую усталость гладких образцов материала кольца из сплава ВТ46 в радиальном, хордовом и высотном направлениях

Предел ограниченной выносливости материала колец составил 500 МПа на базе $2 \cdot 10^7$ циклов. Поскольку изготовить стандартные образцы, ориентированные в высотном и радиальном направлениях, не представлялось возможным ввиду малых габаритов кольца, оценить влияние макроволокна на характеристики малоциклового усталости однозначно невозможно, однако следует отметить, что достаточно большой разброс значений может быть косвенным показателем этого влияния.

В табл. 1 приведены результаты испытаний на трещиностойкость. Испытания подразумевали определение пороговых значений интенсивности напряжений в трех направлениях. Значения СРТУ на этапе развития трещины незначительно зависели от направления, что позволило определить с высокой точностью константы аппроксимирующей функции Пэриса. Тем не менее по результатам расчета констант зафиксирована разница по их величине. Так, для радиального направления средние значения констант C и n составили $3,28 \cdot 10^{-13}$ и 4,82, для высотного $1,66 \cdot 10^{-13}$ и 6,08 и для хордового $9,26 \cdot 10^{-13}$ и 4,18 соответственно.

Таблица 1

Характеристики трещиностойкости образцов материала кольца из сплава ВТ46

Характеристика	ΔK , МПа $\sqrt{м}$	$(dl/dN)10^6$, мм/цикл
Скорость роста усталостной трещины dl/dN при коэффициенте асимметрии цикла $R = 0,1$ при значениях размаха коэффициентов интенсивности напряжений ΔK	7	1,5
	10	8,4
	20	230,0
	30	1596,8
	40	4494,1
	50	23681,8
Константы функции Пэриса $dl/dN = C(\Delta K)^n$	60	90421,5
	C , (мм/цикл)/ МПа $\sqrt{м}$	$1,39 \cdot 10^{-13}$
Пороговые значения интенсивности напряжений ΔK_{th} для образцов с направлением вырезки	n	4,78
	Радиальное	7,27
	Высотное	4,59
	Хордовое	4,55

Восстановленные характеристики трещиностойкости в виде зависимостей функции Пэриса для трех направлений после определения порогового значения интенсивности напряжений представлены на рис. 7, приведены также зависимости трещиностойкости при проведении испытаний без определения порогового значения ΔK_{th} .

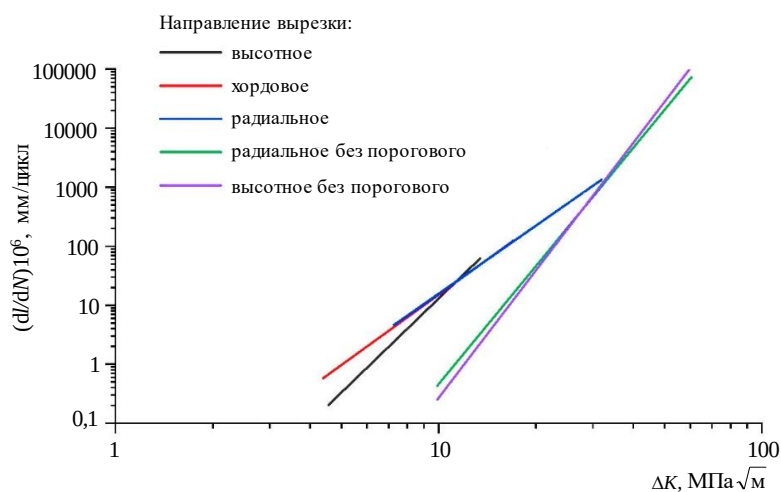


Рис. 7. Восстановленные характеристики трещиностойкости материала колец в условиях проведения испытаний с определением пороговых значений ΔK_{th} и без

Обсуждение результатов и заключения

Оценка влияния макроволокна на усталостные характеристики колец из титановых сплавов представляется достаточно трудоемкой и ограниченной задачей. Трудоемкость такой работы в первую очередь связана с необходимостью исследования микротекстурного состояния, которое возникает в процессе деформации при раскатке материала кольца, однако подобный анализ является очень локальным, а результаты могут отличаться в различных зонах из-за неоднородного поля деформаций при раскатке. С другой стороны, ограниченность такой работы связана с технологическими особенностями производства подобного рода полуфабрикатов. Так, при анализе макроструктуры на рис. 3 отчетливо видны области неоднородной деформации, которые привели к разнотекстурности как по высоте (рис. 3, а – область за оранжевыми линиями), так и в середине кольца по диаметру (рис. 3, б – область между оранжевыми и синими линиями). Очевидно, что такая неоднородная макроструктура является результатом того, что в процессе раскатки кольца заготовка всегда лежит одной плоскостью на главном приводном валке. Так, например, опираясь на исследование макроструктуры при более точном подсчете размеров макрозерен и их ориентации, выделяют области на рис. 3, б, где размер макрозерна достигает до 1 мм, при этом в зависимости от области средний размер макрозерна находится в диапазоне от 500 до 600 мкм, а в областях с менее проработанной структурой – в диапазоне от 1000 до 1500 мкм. С учетом такого разброса подобную макроструктуру нельзя считать однородной и, как следствие, рассматривать полуфабрикаты, полученные путем раскатки с существенными величинами деформации, пригодными для изготовления наиболее ответственных роторных деталей. Вероятно, материал с описанным качеством вполне пригоден для изготовления уплотнительных или корпусных (статорных) колец. С целью повышения однородности макроструктуры материала необходимо разрабатывать и опробовать различные технологические методы и приемы (например – дробление деформации при раскатке с промежуточными подогревами заготовки, снижение величин деформации на операциях

раскатки и т. д.). Отдельного внимания заслуживают красные области на рис. 8, на котором приведено цветовое распределение степени изменения ориентации макроволокон относительно нейтральной линии.

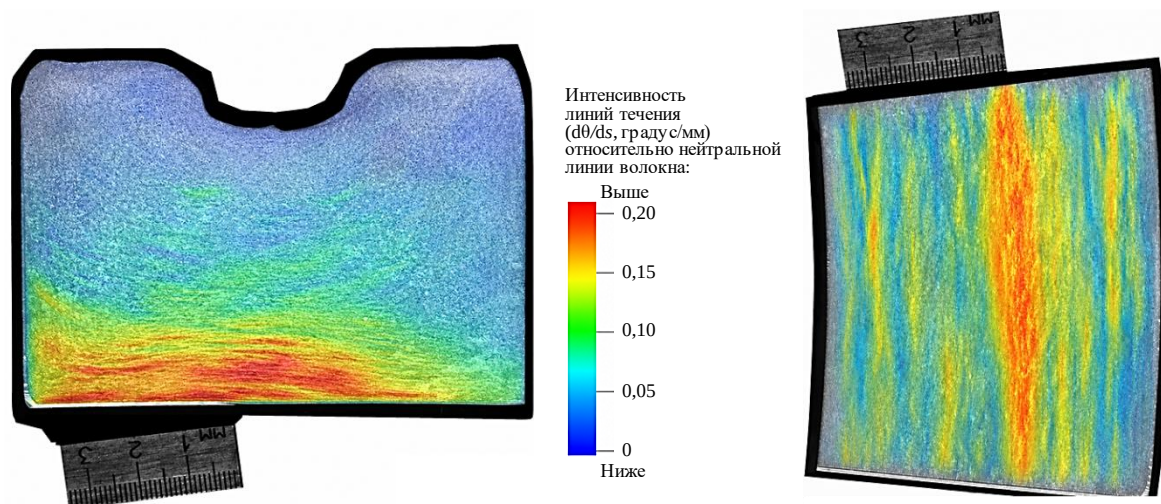


Рис. 8. Распределение ориентаций макроволокон по степени изменения угла отклонения θ в плоскости макротемплетов кольца из сплава ВТ46 (s – участок нейтральной линии)

Наличие крупных и непроработанных областей одновременно может свидетельствовать об отличной кристаллографической текстуре материала, сохранившейся от заготовки на этапе осадки, однако установить это возможно лишь путем поэтапного анализа макроструктуры на каждой операции горячей деформации до и после соответственно.

Полученные характеристики сопротивления усталости материала колец свидетельствуют о значительном влиянии макроволокон на пределы ограниченной выносливости. При анализе результатов исследований отдельно по каждому направлению с построением области значений, куда с вероятностью 0,95 попадут значения, полученные при дальнейших испытаниях, выделяются образцы, ориентированные в высотном направлении. Для них нижняя граница этой области при количестве циклов до разрушения 10^4 составляет 980 МПа, в то время как нижняя граница для хордового, высотного и общего для всей выборки направлений находится в диапазоне от 1025 до 1050 МПа. Если сопоставить эти результаты с ориентацией макроволокон, то станет понятно, что такой разброс значений связан с тем, что в рабочих частях образцов преобладали области с почти непроработанной структурой, сохранившейся с момента подготовки заготовки кольца под раскатку, а в образцах, ориентированных в радиальном и хордовом направлениях, преобладали области с хорошо проработанной макроструктурой с мелким размером зерна.

Наиболее чувствительными к макроволокну, его направлению и размеру зерен оказались испытания на трещиностойкость, при которых определены значения порогового коэффициента концентрации напряжений ΔK_{th} при снижении нагрузки и, как следствие, с предварительным образованием дефекта. Выращенный дефект увеличивается линейно при дальнейшем снижении коэффициента интенсивности напряжений ΔK . Этот коэффициент позволяет при известном значении предела ограниченной выносливости качественно оценить минимальный размер дефекта l_0 по формуле из работы [44] по модели, объясняющей диаграмму Китагавы–Такагаши с точки зрения

дефектно-ориентированного подхода, в котором сам дефект можно представить как пустоту (наподобие поры) или в случае усталостных испытаний – образование трещиноподобных дефектов:

$$l_0 = \frac{(\Delta K_{th}/\Delta\sigma_0)^2}{\pi},$$

где $\Delta\sigma_0$ – предел ограниченной выносливости при мало- или многоциклового усталости при единственном условии, когда характер нагружения материала соответствует схеме растяжения образца.

Однако сами эти расчеты всегда носят оценочный характер – например, в данном случае такие модели не учитывают наличие зеренной и/или многофазной структуры. Тем не менее расчет размеров трещин и данные для расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки минимального размера трещиноподобного дефекта для условий усталостного нагружения

Направление	ΔK_{th} , МПа $\sqrt{м}$	$\Delta\sigma_0$, МПа	l_0 , мкм	l_0 , мкм, при $\Delta\sigma_0 = 500$ МПа
Радиальное	7,27	1050	15,26	67,32
Высотное	4,59	1000	6,70	26,83
Хордовое	4,55	1050	6,98	26,37

На рис. 9 представлено изображение подобных дефектов на фоне микроструктуры кольца.

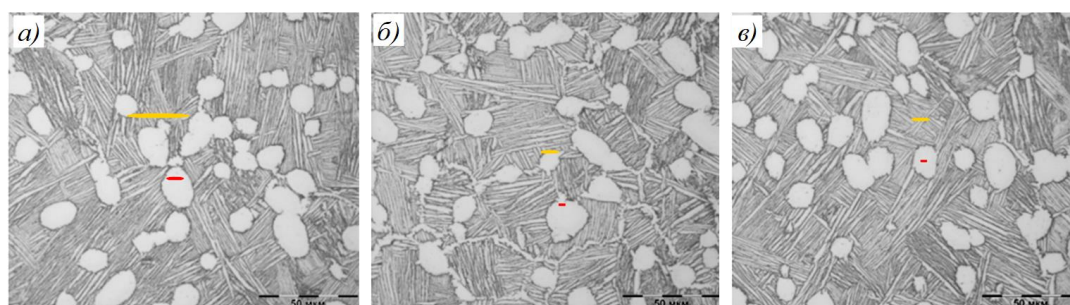


Рис. 9. Сопоставление структурных элементов и расчетных размеров дефектов для колец в радиальном (а), хордовом (б) и высотном (в) направлениях. Оранжевым цветом отмечены дефекты для условий многоциклового усталости, красным – для условий малоциклового усталости

В табл. 2 приведены размеры дефектов для напряжений, соответствующих пределу ограниченной выносливости при многоциклового усталости. Весьма приблизительно, с учетом результатов испытаний на многоциклового усталость по схеме чистый изгиб, можно оценить разницу в размере допустимого дефекта – в ~10 раз больше для этого уровня напряжений.

Таким образом, в данной работе представлены результаты исследований усталостной долговечности и трещиностойкости в зависимости от макроволокна. Основными характеристиками, для которых установлена наиболее высокая чувствительность к макроволокну и макроструктуре, явились малоциклового усталость и трещиностойкость – различия в значениях пороговых значений коэффициента интенсивности напряжений, которые привели к более чем в 2 раза меньшему размеру дефекта. Полученные результаты позволяют, с одной стороны, впервые всесторонне оценить

существующие технологии изготовления кольцевых заготовок методом прокатки на кольцераскатных станах типа RAW с точки зрения не только прочностных характеристик, но и сопротивления усталости, в том числе критического размера дефекта, сопоставимого с типичной микроструктурой. По результатам проведенных исследований становится очевидным, что для изготовления более ответственных деталей, где исходная форма заготовки могла бы быть кольцом, по технологии прокатки на кольцераскатных станах необходимо существенно дорабатывать существующую технологию для обеспечения более однородной макроструктуры и исключения появления непроработанных участков при горячей деформации. В последующих работах авторами данной статьи предполагаются испытания на усталость образцов с концентратором напряжений, при которых, вероятно, следует ожидать значительной анизотропии свойств.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: ведущему инженеру П.В. Рыжкову и инженеру первой категории А.В. Несолонову, за неоценимый вклад в подготовку данной статьи и обсуждение результатов работы.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. № 31. С. 43–47.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
3. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Путырский С.В., Кочетков А.С., Зуева О.В. Современные технологии выплавки слитков титановых сплавов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). С. 30–40. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40
4. Иноземцев А.А., Попова Д.Д., Абрамчук Т.В. и др. Исследование устойчивости авиационного двигателя ПД-14 к воздействию вулканического пепла // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26. № 2 (96). С. 60–70. DOI: 10.54708/19926502_2022_2629660.
5. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Калашников В.С., Заводов А.В. Предпосылки разработки нового малолегированного технологичного титанового сплава средней прочности с рабочей температурой до 400–450 °С, способного к упрочнению // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). С. 33–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-33-50.
6. Chen X., Wang Y. Analysis of fatigue life in high temperature of W pattern sealing rings used in aircraft engine // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 496–500. P. 571–574. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.571.
7. Ding X.Y., Yu Q. The influence of performance of W-type metallic sealing ring with different outer arms open angle // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 971–973. P. 806–810. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.971-973.806.
8. England R. Development of a thin gauge metallic seal for gas turbine engine applications to 1700 F // 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit. 1997. DOI: 10.2514/6.1997-2871.
9. Honnorat Y. Issues and breakthrough in the manufacture of turboengine titanium parts // Materials Science and Engineering: A. 1996. Vol. 213. No. 1–2. P. 115–123. DOI: 10.1016/0921-5093(96)10229-X.
10. Weaver M.J. Mechanical property requirements for aero gas turbine materials // Materials Science and Technology. 1987. Vol. 3. No. 9. P. 695–701. DOI: 10.1179/mst.1987.3.9.695.
11. Kear B.H., Thompson E.R. Aircraft gas turbine materials and processes // Science. 1980. Vol. 208. No. 4446. P. 847–856. DOI: 10.1126/science.208.4446.847.
12. Eylon D., Fujishiro S., Postans P.J., Froes F.H. High-temperature titanium alloys – a review // JOM. 1984. Vol. 36. No. 11. P. 55–62. DOI: 10.1007/BF03338617.

13. Kitashima T., Suresh K.S., Yamabe-Mitarai Y. Present stage and future prospects of development of compressor material // *Crystal Research and Technology*. 2015. Vol. 50. No. 1. P. 28–37. DOI: 10.1002/crat.201400156.
14. Saha B., Jana B., Yadav J.S. et al. Development and certification of Ti-8Al-1Mo-1V alloy for HP compressor blades for Adour engine applications // *Bulletin of Materials Science*. 1996. Vol. 19. No. 4. P. 661–669. DOI: 10.1007/BF02745158.
15. Max B., Alexis J., Larignon C., Perusin S. Titanium alloy Ti-6242 for high temperature structural application. Static and dynamic mechanical properties and impact of ageing // *MATEC Web of Conferences*. 2020. Vol. 321. Art. 11089. DOI: 10.1051/mateconf/202032111089.
16. Nishikiori S., Hattori H., Noda T., Okabe M., Isobe S. Application of heat-resistant titanium-based compressor disk with dual structure // *Materials Science and Engineering: A*. 1996. Vol. 213. No. 1–2. P. 124–127. DOI: 10.1016/0921-5093(96)10257-4.
17. Matsumoto T. Development of near- β high strength Ti alloy Ti-5Al-2Sn-4Zr-3Cr-3Mo with superior fatigue crack growth properties // *Materials Science and Engineering: A*. 1996. Vol. 213. No. 1–2. P. 154–156. DOI: 10.1016/0921-5093(96)10238-0.
18. Elrod C.W. Review of titanium application in gas turbine engines // *Turbo Expo*. 2003. Vol. 3. P. 649–656. DOI: 10.1115/GT2003-38862.
19. Szkliniarz W., Szkliniarz A. Fundamentals of manufacturing technologies for aircraft engine parts made of TiAl based alloys // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016. Vol. 61. No. 3. P. 1385–1390. DOI: 10.1515/amm-2016-0227.
20. Brotzu A., Felli F., Marra F. et al. Mechanical properties of a TiAl-based alloy at room and high temperatures // *Materials Science and Technology*. 2018. Vol. 34. No. 15. P. 1847–1853. DOI: 10.1080/02670836.2018.1491931.
21. Rugg D., Dixon M., Burrows J. High-temperature application of titanium alloys in gas turbines. Material life cycle opportunities and threats – an industrial perspective // *Materials at High Temperatures*. 2016. Vol. 33. No. 4–5. P. 536–541. DOI: 10.1080/09603409.2016.1184423.
22. Tru-Form – a breakthrough in aero engine ring technology // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 1987. Vol. 59. No. 8. P. 18–20. DOI: 10.1108/eb036488.
23. Gebisa A.W., Lemu H.G. Additive manufacturing for gas turbine engine components // *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. 2018. DOI: 10.1115/GT2018-76686.
24. Wang H., Chao Q., Yang L. et al. Introducing transformation twins in titanium alloys: an evolution of α -variants during additive manufacturing // *Materials Research Letters*. 2021. Vol. 9. No. 3. P. 119–126. DOI: 10.1080/21663831.2020.1850536.
25. Sun M., Xu B., Xie B. et al. Leading manufacture of the large-scale weldless stainless steel forging ring: innovative approach by the multilayer hot-compression bonding technology // *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. Vol. 71. P. 84–86. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.08.055.
26. Wang K., Wang L., Zheng K. et al. High-efficiency forming processes for complex thin-walled titanium alloys components: state-of-the-art and perspectives // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2020. Vol. 2. No. 3. Art. 032001. DOI: 10.1088/2631-7990/ab949b.
27. Imamura Y., Ikawa K., Motoyama K. et al. An experimental study for the development of mandrel-free hot-spinning for large size titanium alloy plate forming // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2019. Vol. 141. No. 3. Art. 032501. DOI: 10.1115/1.4041161.
28. Denisov L.V., Boytsov A.G., Siluyanov M.V. Providing of operational properties for gas-turbine engine parts and assemblies using electrospark deposition // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 992. P. 574–579. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.574.
29. Yeom J.T., Kim J.H., Park N.K. et al. Ring-rolling design for a large-scale ring product of Ti-6Al-4V alloy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 187–188. P. 747–751. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.042.
30. Kim K.J., Choi S.S., Hwang C.Y. et al. Ring-rolling process for manufacturing Ti-6Al-4V plane and profiled ring-products // *Advanced Materials Research*. 2007. Vol. 26–28. P. 429–432. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.26-28.429.

31. Chen D.C., You C.S., Guo M.W., Lai B.Y. Robust design of ring rolling process for titanium alloy using the Taguchi method and the finite element method // *Key Engineering Materials*. 2010. Vol. 450. P. 177–180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.450.177.
32. Whittaker R., Fox K., Walker A. Texture variations in titanium alloys for aeroengine applications // *Materials Science and Technology*. 2010. Vol. 26. No. 6. P. 676–684. DOI: 10.1179/026708310X12635619988186.
33. Bache M.R., Evans W.J. Impact of texture on mechanical properties in an advanced titanium alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2001. Vol. 319–321. P. 409–414. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)02034-7.
34. Won J.W., Kim D., Hong S.-G., Lee C.S. Anisotropy in twinning characteristics and texture evolution of rolling textured high purity alpha titanium // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 683. P. 92–99. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.029.
35. Chouhan D.K., Biswas S. Microstructure and texture evolution during multi-direction forging of titanium // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 44. P. 3102–3105. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.490.
36. Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Анисимова А.Ю. Исследование закономерностей формирования структуры прутков из титанового сплава ВТ6 в зависимости от различных технологических схем изготовления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). С. 36–44. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.04.2026). DOI: 10.18577/2071-9140-2023-0-4-36-44.
37. Li W., Chen Z., Liu J. et al. Rolling texture and its effect on tensile property of a near- α titanium alloy Ti60 plate // *Journal of Materials Science & Technology*. 2019. Vol. 35. No. 5. P. 790–798. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.10.032.
38. Shi X.-H., Zeng W.-D., Shi C.-L. et al. The effects of colony microstructure on the fatigue crack growth behavior for Ti–6Al–2Zr–2Sn–3Mo–1Cr–2Nb titanium alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 618. P. 247–253. DOI: 10.1016/j.msea.2014.09.112.
39. Mendia L., Estensoro F.J., Mary C., Vogel F. Effect of combined cycle fatigue on Ti6242 fatigue strength // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. P. 1809–1814. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.301.
40. Evans W.J., Jones J.P., Bache M.R. High-temperature fatigue/creep/environment interactions in compressor alloys // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2003. Vol. 125. No. 1. P. 246–251. DOI: 10.1115/1.1498272.
41. Wang M. Comparison of evolution laws of stress and strain fields in hot rolling of titanium alloy large rings with different sizes // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011. Vol. 21. No. 7. P. 1611–1619. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60904-7.
42. Краснов И.С., Ложкова Д.С., Далин М.А. Оценка дефектности заготовок из титановых сплавов для вероятностного расчета риска разрушения дисков газотурбинных двигателей в эксплуатации // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). С. 115–122. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
43. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Медведев П.Н., Павлова Т.В. Исследование двухфазного титанового сплава системы Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -стабилизаторы // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
44. Murakami Y., Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength // *International Journal of Fatigue*. 1994. Vol. 16. No. 3. P. 163–182. DOI: 10.1016/0142-1123(94)90001-9.

References

1. Kablov E.N. Materials and technology VIAM for «Aviadvigatel». *Permskie aviatsionnye dvigateli*, 2014, no. 31, pp. 43–47.
2. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
3. Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Putyrskiy S.V., Kochetkov A.S., Zueva O.V. Modern technologies for melting titanium alloy ingots (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 30–40. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 30, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40

4. Inozemtsev A.A., Popova D.D., Abramchuk T.V. et al. Study of the stability of the PD-14 aircraft engine to the effects of volcanic ash. *Vestnik UGATU*, 2022, vol. 26, no 2 (96), pp. 60–70. DOI: 10.54708/19926502_2022_2629660.
5. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Kalashnikov V.S., Za-vodov A.V. Prerequisites for the development of new low-alloyed technological medium strength titanium alloy with operating temperature up to 400–450 °C, capable of strengthening. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), pp. 33–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 30, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-33-50.
6. Chen X., Wang Y. Analysis of fatigue life in high temperature of W pattern sealing rings used in aircraft engine. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 496–500, pp. 571–574. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.496-500.571.
7. Ding X.Y., Yu Q. The influence of performance of W-type metallic sealing ring with different outer arms open angle. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 971–973, pp. 806–810. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.971-973.806.
8. England R. Development of a thin gauge metallic seal for gas turbine engine applications to 1700 F. *33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1997. DOI: 10.2514/6.1997-2871.
9. Honnorat Y. Issues and breakthrough in the manufacture of turboengine titanium parts. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, vol. 213, no. 1–2, pp. 115–123. DOI: 10.1016/0921-5093(96)10229-X.
10. Weaver M.J. Mechanical property requirements for aero gas turbine materials. *Materials Science and Technology*, 1987, vol. 3, no. 9, pp. 695–701. DOI: 10.1179/mst.1987.3.9.695.
11. Kear B.H., Thompson E.R. Aircraft gas turbine materials and processes. *Science*, 1980, vol. 208, no. 4446, pp. 847–856. DOI: 10.1126/science.208.4446.847.
12. Eylon D., Fujishiro S., Postans P.J., Froes F.H. High-temperature titanium alloys – a review. *JOM*, 1984, vol. 36, no. 11, pp. 55–62. DOI: 10.1007/BF03338617.
13. Kitashima T., Suresh K.S., Yamabe-Mitarai Y. Present stage and future prospects of development of compressor material. *Crystal Research and Technology*, 2015, vol. 50, no. 1, pp. 28–37. DOI: 10.1002/crat.201400156.
14. Saha B., Jana B., Yadav J.S. et al. Development and certification of Ti-8Al-1Mo-1V alloy for HP compressor blades for Adour engine applications. *Bulletin of Materials Science*, 1996, vol. 19, no. 4, pp. 661–669. DOI: 10.1007/BF02745158.
15. Max B., Alexis J., Larignon C., Perusin S. Titanium alloy Ti-6242 for high temperature structural application. Static and dynamic mechanical properties and impact of ageing. *MATEC Web of Conferences*, 2020, vol. 321, art. 11089. DOI: 10.1051/mateconf/202032111089.
16. Nishikiori S., Hattori H., Noda T., Okabe M., Isobe S. Application of heat-resistant titanium-based compressor disk with dual structure. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, vol. 213, no. 1–2, pp. 124–127. DOI: 10.1016/0921-5093(96)10257-4.
17. Matsumoto T. Development of near- β high strength Ti alloy Ti-5Al-2Sn-4Zr-3Cr-3Mo with superior fatigue crack growth properties. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, vol. 213, no. 1–2, pp. 154–156. DOI: 10.1016/0921-5093(96)10238-0.
18. Elrod C.W. Review of titanium application in gas turbine engines. *Turbo Expo*, 2003, vol. 3, pp. 649–656. DOI: 10.1115/GT2003-38862.
19. Szkliniarz W., Szkliniarz A. Fundamentals of manufacturing technologies for aircraft engine parts made of TiAl based alloys. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, vol. 61, no. 3, pp. 1385–1390. DOI: 10.1515/amm-2016-0227.
20. Brotzu A., Felli F., Marra F. et al. Mechanical properties of a TiAl-based alloy at room and high temperatures. *Materials Science and Technology*, 2018, vol. 34, no. 15, pp. 1847–1853. DOI: 10.1080/02670836.2018.1491931.
21. Rugg D., Dixon M., Burrows J. High-temperature application of titanium alloys in gas turbines. Material life cycle opportunities and threats – an industrial perspective. *Materials at High Temperatures*, 2016, vol. 33, no. 4–5, pp. 536–541. DOI: 10.1080/09603409.2016.1184423.
22. Tru-Form – a breakthrough in aero engine ring technology. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1987, vol. 59, no. 8, pp. 18–20. DOI: 10.1108/eb036488.

23. Gebisa A.W., Lemu H.G. Additive manufacturing for gas turbine engine components. *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, 2018. DOI: 10.1115/GT2018-76686.
24. Wang H., Chao Q., Yang L. et al. Introducing transformation twins in titanium alloys: an evolution of α -variants during additive manufacturing. *Materials Research Letters*, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 119–126. DOI: 10.1080/21663831.2020.1850536.
25. Sun M., Xu B., Xie B. et al. Leading manufacture of the large-scale weldless stainless steel forging ring: innovative approach by the multilayer hot-compression bonding technology. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, vol. 71, pp. 84–86. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.08.055.
26. Wang K., Wang L., Zheng K. et al. High-efficiency forming processes for complex thin-walled titanium alloys components: state-of-the-art and perspectives. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2020, vol. 2, no. 3, art. 032001. DOI: 10.1088/2631-7990/ab949b.
27. Imamura Y., Ikawa K., Motoyama K. et al. An experimental study for the development of mandrel-free hot-spinning for large size titanium alloy plate forming. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2019, vol. 141, no. 3, art. 032501. DOI: 10.1115/1.4041161.
28. Denisov L.V., Boytsov A.G., Siluyanov M.V. Providing of operational properties for gas-turbine engine parts and assemblies using electrospark deposition. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 992, pp. 574–579. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.992.574.
29. Yeom J.T., Kim J.H., Park N.K. et al. Ring-rolling design for a large-scale ring product of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 187–188, pp. 747–751. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.042.
30. Kim K.J., Choi S.S., Hwang C.Y. et al. Ring-rolling process for manufacturing Ti-6Al-4V plane and profiled ring-products. *Advanced Materials Research*, 2007, vol. 26–28, pp. 429–432. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.26-28.429.
31. Chen D.C., You C.S., Guo M.W., Lai B.Y. Robust design of ring rolling process for titanium alloy using the Taguchi method and the finite element method. *Key Engineering Materials*, 2010, vol. 450, pp. 177–180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.450.177.
32. Whittaker R., Fox K., Walker A. Texture variations in titanium alloys for aeroengine applications. *Materials Science and Technology*, 2010, vol. 26, no. 6, pp. 676–684. DOI: 10.1179/026708310X12635619988186.
33. Bache M.R., Evans W.J. Impact of texture on mechanical properties in an advanced titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, vol. 319–321, pp. 409–414. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)02034-7.
34. Won J.W., Kim D., Hong S.-G., Lee C.S. Anisotropy in twinning characteristics and texture evolution of rolling textured high purity alpha titanium. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 683, pp. 92–99. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.05.029.
35. Chouhan D.K., Biswas S. Microstructure and texture evolution during multi-direction forging of titanium. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44, pp. 3102–3105. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.490.
36. Krokhnina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Anisimova A.Yu. Investigation of the regularities of the formation of the structure of rods made of titanium alloy VT6 depending on various technological schemes of manufacture. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), pp. 36–44. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 30, 2026). DOI: 10.18577/2071-9140-2023-0-4-36-44.
37. Li W., Chen Z., Liu J. et al. Rolling texture and its effect on tensile property of a near- α titanium alloy Ti60 plate. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, vol. 35, no. 5, pp. 790–798. DOI: 10.1016/j.jmst.2018.10.032.
38. Shi X.-H., Zeng W.-D., Shi C.-L. et al. The effects of colony microstructure on the fatigue crack growth behavior for Ti-6Al-2Zr-2Sn-3Mo-1Cr-2Nb titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 618, pp. 247–253. DOI: 10.1016/j.msea.2014.09.112.
39. Mendia L., Estensoro F.J., Mary C., Vogel F. Effect of combined cycle fatigue on Ti6242 fatigue strength. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 10, pp. 1809–1814. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.301.

40. Evans W.J., Jones J.P., Bache M.R. High-temperature fatigue/creep/environment interactions in compressor alloys. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, vol. 125, no. 1, pp. 246–251. DOI: 10.1115/1.1498272.
41. Wang M. Comparison of evolution laws of stress and strain fields in hot rolling of titanium alloy large rings with different sizes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, vol. 21, no. 7, pp. 1611–1619. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)60904-7.
42. Krasnov I.S., Lozhkova D.S., Dalin M.A. Evaluation of deficiency of titanium alloy forgings for probabilistic calculation of gas turbine engine disks fracture risk. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), pp. 115–122. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: April 04, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-115-122.
43. Kablov E.N., Kashapov O.S., Medvedev P.N., Pavlova T.V. Study of a $\alpha + \beta$ -titanium alloy based on a system of Ti–Al–Sn–Zr–Si– β -stabilizing alloying elements. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 30–37. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-30-37.
44. Murakami Y., Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. *International Journal of Fatigue*, 1994, vol. 16, no. 3, pp. 163–182. DOI: 10.1016/0142-1123(94)90001-9.

Информация об авторах

Кашапов Олег Салаватович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кондратьева Анастасия Романовна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Монин Сергей Алексеевич, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Калашников Владимир Сергеевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Oleg S. Kashapov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anastasia R. Kondratyeva, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Monin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir S. Kalashnikov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 18.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.05.2026.
The article was submitted 18.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 21.05.2026.