

Научная статья

УДК 669.018.44:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-34-44

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ
МАТЕРИАЛА ЛИСТОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT41
ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ
В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ
В МАЛО- И МНОГОЦИКЛОВОЙ ОБЛАСТИ**

О.С. Кашапов¹, П.В. Рыжков¹, О.В. Чучман¹, С.А. Наприенко¹

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

***Аннотация.** Изложены и обобщены результаты испытаний механических свойств материала промышленных листов толщиной 2,0 мм из жаропрочного титанового сплава марки VT41. Приведены данные по результатам испытаний на растяжение, мало- и многоцикловую усталость гладких образцов. Представлены результаты испытаний образцов на растяжение с корсетной формой рабочей части при различных скоростях нагружения. По результатам испытаний построена кривая в областях статического, повторно-статического, малоциклового и классического многоциклового разрушения.*

***Ключевые слова:** титановые сплавы, механические свойства, сопротивление усталости, листы из титановых сплавов, фазовый состав, псевдо- α -сплавы*

***Для цитирования:** Кашапов О.С., Рыжков П.В., Чучман О.В., Наприенко С.А. Исследование сопротивления усталости материала листов из титанового сплава VT41 при комнатной температуре в условиях одноосного растяжения в мало- и многоцикловой области // Труды ВИАМ. 2024. № 10 (140). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-34-44.*

Scientific article

**INVESTIGATION OF THE FATIGUE STRENGTH
OF VT41 TITANIUM ALLOY SHEET MATERIAL
AT ROOM TEMPERATURE
UNDER UNIAXIAL STRETCHING CONDITIONS
IN THE LOW- AND HIGH-CYCLE REGION**

O.S. Kashapov¹, P.V. Ryzhkov¹, O.V. Chuchman¹, S.A. Naprienko¹

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 article presents and summarizes the test results of the mechanical properties of material of industrial sheets with a thickness of 2,0 mm made of heat-resistant titanium alloy VT41. The results of tensile tests, low- and high-cycle fatigue tests of flat samples are presented as well as the results of tensile testing of samples with a corset shape of the working part at different loading speeds. On the base of tests results a stress-cycles to failure curve is constructed in the areas of static, re-static, low-cycle and classical high-cycle destruction.*

***Keywords:** titanium alloys, mechanical properties, fatigue strength, titanium sheets, phase composition, pseudo- α -alloys*

For citation: Kashapov O.S., Ryzhkov P.V., Chuchman O.V., Naprienko S.A. Investigation of the fatigue strength of VT41 titanium alloy sheet material at room temperature under uniaxial stretching conditions in the low- and high-cycle region. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-34-44.

Введение

Вопросы сопротивления усталости материалов деталей авиационной техники, связи кривых статического и циклического деформирования особенно остро стоят перед специалистами авиационной промышленности. Эксплуатация новых и существующих изделий проходит в условиях возрастания экстремальных нагрузок при длительном полетном цикле. В настоящее время становится вполне достижимым ресурс деталей газотурбинных двигателей (ГТД) в гигацикловой области усталости [1–3] – даже для тех случаев, где подобная долговечность ранее не предполагалась. Усталостное нагружение для ресурсных изделий оценивают как характерный вид нагрузок в случае статорных корпусных деталей ГТД [4, 5]. Как правило, при эксплуатации имеют место типовые расчетные нагрузки полетного цикла, которые складываются с нагрузками, связанными с воздействием газодинамических сил и конструктивно-технологическими особенностями изделий, и не всегда поддаются учету [6–8]. Модели развития повреждений при циклическом и статическом нагружении служат базовым инструментом для прогнозирования ресурса деталей. Одной из новых областей применения листов из жаропрочных титановых сплавов являются сборочные единицы, входящие в состав выходного устройства ГТД [9]. Успешное применение титановых конструкций можно продемонстрировать на примере такого выходного устройства на пассажирском самолете А380 [10]. Рассматривается применение титановых конструкций выходного устройства для турбовальных вертолетных двигателей [11]. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проведено комплексное исследование материала листов из жаропрочного титанового сплава марки ВТ41 [12]. В данной работе установлен комплекс механических свойств материала листов толщиной от 0,5 до 4,5 мм в отожженном состоянии, исследованы микроструктура и фазовый состав. Предполагаемая область применения – корпусные детали ГТД и другие изделия авиационной техники. В представленной статье изложены результаты исследований, касающиеся характеристик механических свойств при комнатной температуре, полученных при испытаниях на растяжение, мало- и многоцикловую усталость. При испытаниях на растяжение в упругой области нагружения в материале проявляются процессы релаксации на различных дефектах кристаллической решетки и дефектах, вызванных металлургическим процессом изготовления. Интегральная количественная оценка этих процессов содержится в соответствующей части диаграммы растяжения каждого конкретного образца. При циклическом деформировании в области упругопластического поведения (область текучести диаграммы растяжения) функциональная зависимость между напряжениями и деформациями носит нелинейный характер, при этом кривые нагружения при нагрузке и разгрузке не совпадают, что ведет к образованию петель гистерезиса, свидетельствующих о рассеянии энергии [13, 14]. Применявшаяся методика усталостных испытаний для листов из сплава ВТ41 (испытание при растяжении с асимметрией цикла 0,1 на образцах одного типа для мало- и многоцикловой усталости) позволяет провести анализ полученных результатов именно с этой точки зрения.

Исследования выполнены с использованием оборудования Испытательного Центра НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [15–17] и ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Отметим, что вопросы, связанные с влиянием эксплуатационных факторов, а также отдельных технологических операций изготовления листов, деталей и сборочных единиц на физико-механические свойства листов из титановых сплавов, неизменно находятся в поле зрения специалистов

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [18–20]. Исследования выполнены в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [21, 22].

Материалы и методы

Исследования проводили на промышленных горячекатаных листах толщиной 2 мм в отожженном состоянии. Промышленный слиток, выплавленный методом тройного вакуумно-дугового переплава, ковали при температурах β -области на промежуточную заготовку (сляб), далее прокатку сляба осуществляли при температурах β -области. После механической обработки листовую прокатку заготовок проводили в $(\alpha + \beta)$ -области. Тонкие листы толщиной 2 мм получали методом пакетной прокатки при температурах $(\alpha + \beta)$ -области. Химический состав материала листов представлен в виде алюминиевого и молибденового эквивалентов (табл. 1). Термическая обработка листов – одноступенчатый отжиг по режиму, оговоренному в отраслевой технологической документации. Состояние поверхности листов – шлифованное и травленное. Механические свойства листов определяли по стандартным методикам – ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 25.502–82, угол изгиба – согласно ОСТ 1 90218–76. Все образцы вырезали поперек направления окончательных операций горячей прокатки.

Таблица 1

Химический состав в алюминиевом и молибденовом эквивалентах для сплава ВТ41 (лист толщиной 2 мм)

Содержание основных химических элементов, % (по массе)		
Ti	[Al]	[Mo]
Основа	8,85	1,79

Механические свойства листов при комнатной температуре, определенные при приемосдаточных испытаниях на металлургическом предприятии ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», приведены в табл. 2. Исследование механических свойств в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводили на образцах типа 1 по ГОСТ 1497–84 (табл. 3).

Таблица 2

Результаты приемосдаточных испытаний для угла изгиба и механических свойств при комнатной температуре для сплава ВТ41 (лист толщиной 2 мм)

Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Угол изгиба, градус
1090	15,9	49
1083	15,7	46
1089	15,6	47

Таблица 3

Результаты испытаний при растяжении при комнатной температуре для сплава ВТ41 (лист толщиной 2 мм)

Модуль упругости E , МПа	Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$, МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %
114	920	1030	1090	14,5
116	920	1020	1080	14,5
114	920	1020	1080	15,5
115	920	1030	1090	14,5
116	920	1030	1090	14,5

По химическому составу и механическим свойствам материал листов соответствует требованиям действующей нормативной документации на поставку.

Для испытаний на сопротивление усталости использовали образцы (эскиз – на рис. 1), разработанные с учетом требований стандарта ASTM E466. Образцы для испытаний на растяжение при различных скоростях нагружения имели такую же геометрическую форму, как и образцы для испытаний на усталость.

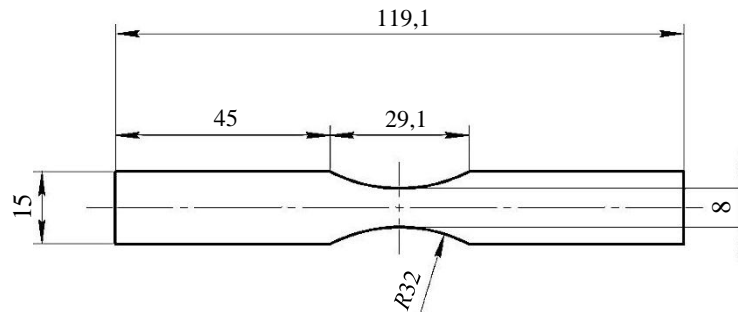


Рис. 1. Образец для испытаний на усталость

Усталостные испытания проводили при асимметричном цикле нагружения $R_\sigma = 0,1$. Частота нагружения для малоциклового области (до $2 \cdot 10^4$ циклов) составила $f = 2$ Гц, для многоциклового области – $f = 40$ Гц. Металлографические исследования проводили на растровом электронном микроскопе.

Результаты и обсуждение

Микроструктура материала листов – преимущественно глобулярная, соответствует 1 типу по 9-типной шкале ГОСТ 26492–85. В материале присутствуют отдельные не-сфероидизированные частицы первичной α -фазы (рис. 2, а, б). При больших увеличениях различимы частицы силицидов титана (светлые частицы с размерностью порядка долей мкм), а также превращенной пластинчатой α -фазы в β -прослойках (рис. 2, в, г).

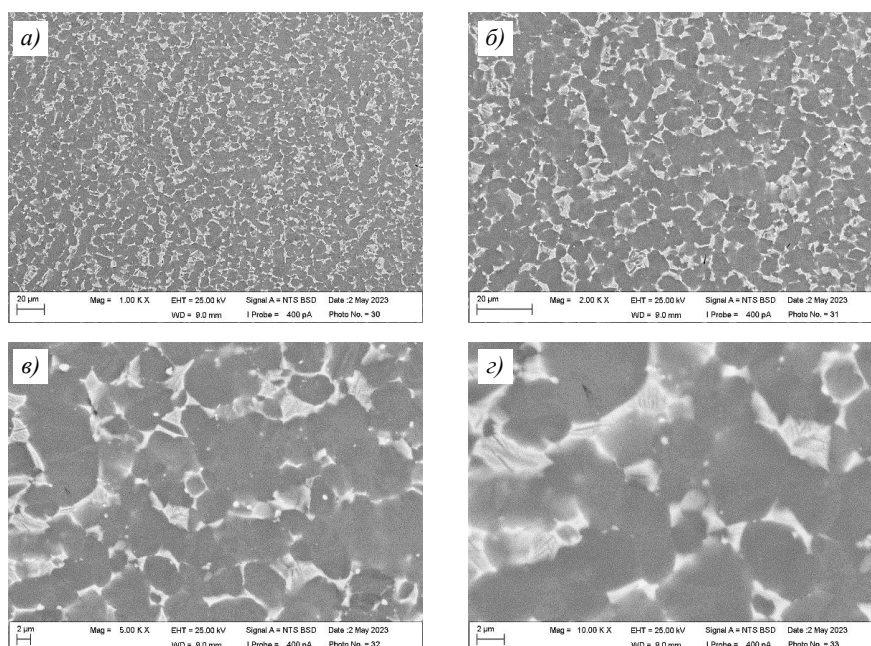


Рис. 2. Микроструктуры (растровая электронная микроскопия) листов из сплава BT41 в отожженном состоянии (после одноступенчатого отжига)

В табл. 4 приведены результаты испытаний листов на сопротивление усталости.

Таблица 4

Результаты испытаний на усталость листов из сплава ВТ41 толщиной 2 мм

Частота нагружения f , Гц	Максимальное напряжение в цикле σ_{\max} , МПа	Количество циклов до разрушения N	Состояние листа
2	1150	751	Разрушен
	1150	948	
	1150	1147	
	1100	4816	
	1100	5071	
	1100	5148	
	1050	7903	
	1050	8611	
	1050	9447	
	1000	10368	
	1000	12447	
	1000	13578	
	950	17927	
950	19203		
950	24862		
40	750	74615	Разрушен
	700	65333	
	600	115111	
	600	3869057	
	600	4050710	
	500	1480736	
	500	2693350	
	500	14804640	
	450	8672881	
	450	12878111	
	450	14212285	
	400	20 000 000	
	400	20 000 000	
400	20 000 105		

На рис. 3 построена кривая усталости по результатам испытаний образцов при двух частотах нагружения. Закономерность увеличения долговечности при снижении уровня напряжений охватывает две группы разрушенных усталостных образцов – преимущественно в малоцикловой области (межкристаллитное развитие усталостного разрушения) и в многоцикловой (внутрикристаллитное).

Статическое разрушение при однократном растяжении стандартных плоских образцов происходит при напряжениях, уровень которых несколько ниже (табл. 3), чем при повторно-статическом нагружении образцов на усталость (табл. 4). Полученный результат указывает на влияние скорости нагружения на напряжение течения и предел прочности при разрыве. Аналитические решения краевых нелинейных задач теории концентрации напряжений практически отсутствуют. В связи с этим для исследования эффектов перераспределения напряжений и деформаций в неупругой области проведены испытания на растяжение при различных скоростях нагружения (рис. 3).

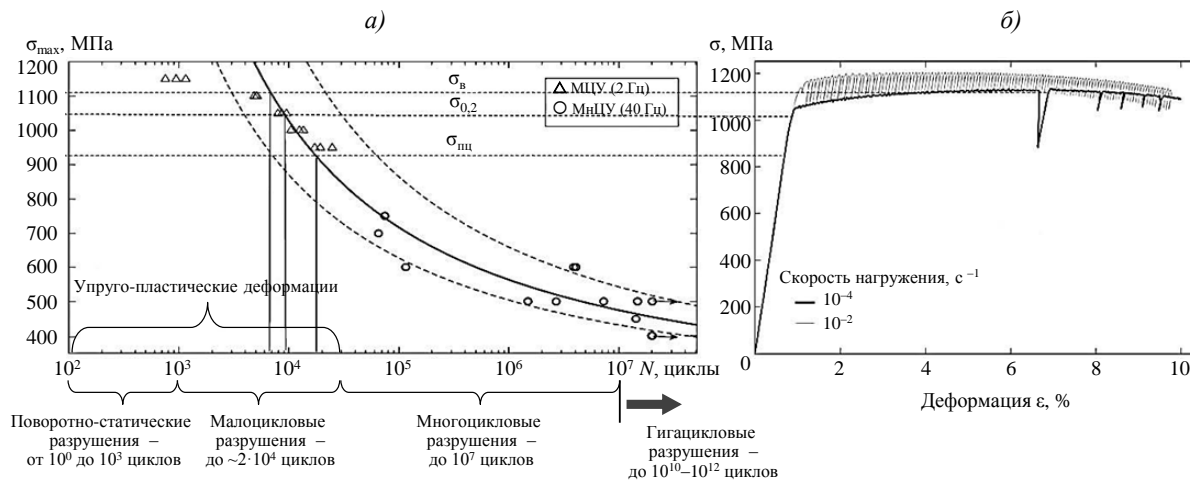


Рис. 3. Возможный вид кривой усталости (а) и связь с фактической диаграммой растяжения (б) листов из сплава ВТ41 с учетом данных работы [1] (МЦУ – малоцикловая усталость; МнЦУ – многоцикловая усталость)

Испытания проведены с постоянной скоростью упругопластической деформации при «жестком» нагружении. Перемещения регистрировали экстензометром, закрепленным на рабочей части образца. Испытание, проведенное при скорости $0,0001 \text{ с}^{-1}$, сопоставимое с испытанием по ГОСТ 1497–84 со скоростью 10 МПа/с , указывает на увеличение условного предела текучести и предела прочности при растяжении в среднем на 30 МПа . Это увеличение напряжения связано с локальной концентрацией напряжений в рабочей части образца для испытаний на усталость. Испытание, проведенное при скорости $0,01 \text{ с}^{-1}$, сопоставимое с испытанием на усталость при частоте 2 Гц , указывает на увеличение условного предела текучести и предела прочности при растяжении в среднем на 100 МПа . Таким образом, уровень нагружения 1150 МПа с долговечностью $\sim 10^3$ циклов не противоречит экспериментальным результатам при растяжении.

Полученный результат не типичен, например, для поковок из сплава ВТ41 с мелкозернистой микроструктурой после двойного отжига [23]. Предел малоцикловой усталости при «мягком» цикле нагружения находится между значениями кратковременной прочности и условного предела текучести ($\sigma_{0.2}^{20^\circ} = 1015\text{--}1115 \text{ МПа}$, $\sigma_b^{20^\circ} = 1070\text{--}1165 \text{ МПа}$, $\sigma_{0.1} = 1040 \text{ МПа}$ на базе 10^4 циклов).

Ошибка при определении характеристик при испытаниях на растяжение исключена, так как данные по результатам приемосдаточных испытаний на металлургическом предприятии и в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ близки по значениям (табл. 2 и 3), а материал листов обладает стабильными характеристиками при однократном растяжении.

В области долговечностей $\sim 10^6$ циклов имеет место смена механизмов разрушения – плосконапряженное состояние материала образца в области переходной долговечности переходит в плоскодеформированное. Переходная долговечность и смена доминирующего механизма разрушения обусловлена уровнем напряжений и однородностью металлического материала. Далее в интервале долговечностей от 10^6 до $2 \cdot 10^7$ циклов наблюдается асимптотическое стремление к определенному значению напряжения.

На рис. 3, б также изображена фактическая диаграмма растяжения для отображения связи с получившейся кривой усталости – отчетливо видно, что область многоциклового усталости лежит в пределах упругих деформаций при напряжениях, не превышающих предел пропорциональности. Сопоставляя предел пропорциональности

и предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, получаем, что предел выносливости соответствует значению $0,45\sigma_{\text{пл}}$.

Рассеяние долговечности увеличивается с уменьшением амплитуды напряжений в связи с локализацией деформации по «дефектным» объемам материала и переходом процесса разрушения на новый структурный уровень [24]. В условиях плосконапряженного состояния при повторно-статическом и малоцикловом нагружении неопределенность долговечности сведена к минимуму из-за более интенсивного накопления повреждений. Пластические деформации при этом полностью охватывают рабочую часть образца, а при разрушении около трещин происходят нестационарные процессы циклического пластического деформирования. При этом размеры зон пластических деформаций сопоставимы с размерами трещин нагружаемого материала. С использованием нелинейной аппроксимации результатов испытаний проведено сравнение рассеяния долговечности образцов исследуемого сплава при одноосном нагружении и образцов штамповок из сплава ВТ41 с регламентированной глобулярно-пластинчатой микроструктурой по схеме нагружения при изгибе с вращением (рис. 4).

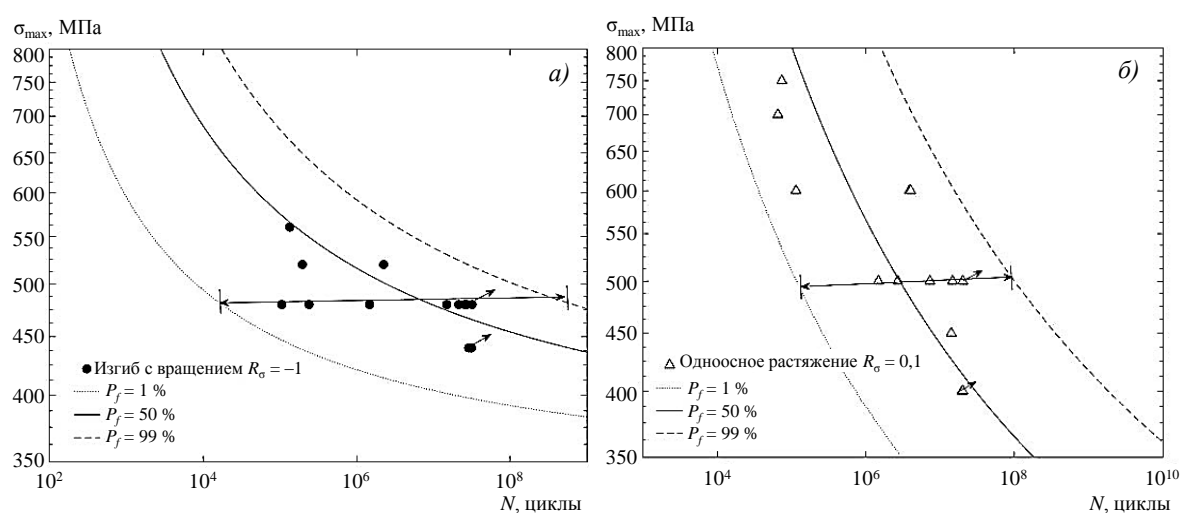


Рис. 4. Кривые усталости для сплава ВТ41 при изгибе с вращением (а) и одноосном растяжении (б) (P_f – вероятность разрушения)

При максимальном напряжении цикла, равном 500 МПа, в случае одноосного нагружения листовых образцов, область интервала рассеяния составляет от 10^5 до 10^8 циклов, в то время как для схемы при изгибе с вращением при максимальном напряжении цикла, равном 490 МПа, область интервала составляет от 10^4 до $5 \cdot 10^8$ циклов. Одной из причин наблюдаемых результатов может быть форма и качество поверхности рабочей части образца, так как боковые поверхности подвергались только чистовому фрезерованию (чистота и качество поверхности оценены в работе [25]). Незначительное различие рассеяния долговечности на выбранном уровне нагружения не позволяет судить с достаточной точностью о влиянии геометрической формы образца, состояния поверхности и схемы нагружения на накопление повреждений при многоцикловом нагружении. Однако если сравнивать две схемы нагружения и различную шероховатость по количеству разрушенных и неразрушенных образцов до достижения базовой долговечности $2 \cdot 10^7$ циклов на рассматриваемом уровне нагружения, то сравнительно большую долговечность демонстрируют образцы, испытанные по схеме при изгибе с вращением с меньшей шероховатостью поверхности. Существует ряд работ, в которых объяснен совокупный эффект влияния шероховатости и градиента напряжений [24, 26]. Как при осевом нагружении, так и при схеме нагружения изгиб с вращением в режиме

многоциклового усталости, очаг разрушения расположен на поверхности. При развитии повреждений в случае схемы нагружения при изгибе с вращением трещины растут не так быстро по причине уменьшения напряжения к центру сечения рабочей части по отношению к осевому нагружению, в котором градиент напряжений отсутствует. Влияние шероховатости проявляется в конкурирующем росте поверхностных трещин на рабочей части образца. Совокупный эффект шероховатости и градиента напряжений в основном реализуется на участке долговечности от 10^5 до 10^6 циклов.

Проведение аналогичных испытаний на листах из сплава ВТ41 в будущих работах позволит провести более детальный анализ особенностей усталостного разрушения во взаимосвязи со степенью дисперсионного упрочнения.

Заключения

При определении средних значений пределов выносливости материала в области малоциклового и многоциклового усталости полученные результаты позволили построить общую кривую усталости по схеме одноосного циклического растяжения. При этом полученные результаты недостаточны для анализа медианной кривой в промежуточной области долговечности от $5 \cdot 10^4$ до 10^6 циклов, где может быть существенное рассеяние долговечности, что, по-видимому, обусловлено переходным механизмом накопления повреждений в результате «квазиупругих» деформаций.

Для исследования эффектов перераспределения напряжений и деформаций в неупругой области проведены испытания на растяжение при различных скоростях нагружения. По результатам испытаний на растяжение корсетных образцов установлено увеличение напряжения течения и предела прочности при разрыве на 30 МПа ввиду концентрации напряжений в рабочей части. Увеличение скорости нагружения, сопоставимой с испытаниями на усталость, привело к увеличению напряжения течения и предела прочности при разрыве на 100 МПа.

При сравнении двух схем нагружения и различной шероховатости поверхности рабочей части в интервале долговечности от 10^6 до $2 \cdot 10^7$ циклов сравнительно большую долговечность демонстрируют образцы, испытанные по схеме при изгибе с вращением, с меньшей шероховатостью поверхности.

Список источников

1. Шанявский А.А., Солдатенков А.П. Масштабные уровни предела усталости металлов // Физическая мезомеханика. 2019. № 1. С. 44–53. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-11005.
2. Burago N.G., Nikitin I.S., Shanyavski A.A., Zhuravlev A.B. Durability estimations for in-service titanium compressor disks subjected to multiaxial cyclic loads in low- and very-high-cycle fatigue regimes // Proceedings of 19th European Conference on Fracture (Kazan, Russia, 26–31 Aug. 2012). URL: <https://www.grouppofrattura.it> (дата обращения: 11.02.2024).
3. Белоусов Г.Г., Никитин А.Д., Шанявский А.А. Модель усталостного разрушения в эксплуатации титанового диска вентилятора двигателя ТА12-60 // Научный вестник МГТУГА. 2013. № 187. С. 103–107.
4. Равикович Ю.А., Холобцев Д.П., Архипов А.Н., Шахов А.С. Расчетно-экспериментальное исследование динамики и прочности основных деталей ГТД с учетом геометрических отклонений // Вестник УГАТУ. 2023. Т. 27. № 1 (99). С. 47–59.
5. Соловьев Б.А., Куландин А.А., Макаров Н.В. Устройство и летная эксплуатация силовых установок. М.: Транспорт, 1991. 256 с.
6. Пахоменков А.В. Расчетно-экспериментальное прогнозирование малоциклового долговечности и ресурса дисков ГТД с учетом влияния аналитических и эксплуатационных факторов: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2020. 154 с.
7. Макаров П.В., Колотников М.Е., Веденеев В.В., Абдухакимов Ф.А. Комплексный анализ динамического поведения лопаток компрессора на этапе проектирования // Авиационные двигатели. 2023. № 3 (20). С. 20–27.

8. Петухов А.Н. Проблемы многоциклового усталости конструкционных материалов и деталей ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3 (34). С. 17–25. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-3-1(34)-17-25.
9. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. 1204 с.
10. De Monicault J.-M., Guedou J.-Y., Soniak F. Issues and progress in manufacturing of aero titanium parts // 24th ITA: Titanium conference Proceedings. Las Vegas, 2008. P. 7.
11. Geary B., Bolam V.J., Jenkins S.L., Davies D.P. High temperature titanium sheet for helicopter exhaust applications // 8th Titanium World Conference. London: Cambridge University Press, 1996. P. 1638–1645.
12. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Поковки из жаропрочного титанового сплава ВТ41 для изготовления корпусов изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2022. № 9 (115). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-39-57.
13. Махутов Н.А., Гденини М.М. Исследование обобщенных кривых статического и циклического деформирования, повреждения и разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 5. С. 46–54. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-5-46-55.
14. Капустин В.И., Захарченко К.В., Черепанова В.К., Шаяпов В.Р. Исследование диссипативных процессов сплава ВТ6 при усталости // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 4 (69). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 01.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.
15. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Влияние среднего напряжения цикла на характеристики малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.
16. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Каранов В.А., Юшин В.Д. Влияние вида нагружения на многоцикловую усталость жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
17. Дуюнова В.А., Путырский С.В., Арисланов А.А., Крохина В.А., Ширяев А.А. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства прутков из сплава ВТ47 // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34.
18. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 2. С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
19. Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Особенности структурно-фазового состава и механических свойств псевдо- β -титанового сплава ВТ47, легированного добавками кремния // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.02.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-51-60.
20. Дзунович Д.А., Лукина Е.А., Яковлев А.Л. Влияние режимов термической обработки на технологичность и механические свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23 // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
21. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
22. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
23. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- α титанового сплава ВТ41 // Титан. 2016. № 2 (52). С. 33–42.

24. Shrestha R., Simsiriwong J., Shamsaei N. Fatigue behavior of additive manufactured 316L stainless steel under axial versus rotating-bending loading: Synergistic effects of stress gradient, surface roughness, and volumetric defects // *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 144. P. 106063. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106063.
25. Медведев П.Н., Кашапов О.С., Решетило Л.П. Исследование поверхностных слоев титанового сплава BT41 после механической обработки // *Вопросы материаловедения*. 2022. № 1 (109). С. 54–63.
26. Derimow N., Benzing J., Newton D., Beamer C. Microstructural effects on the rotating bending fatigue behavior of Ti–6Al–4V produced via laser powder bed fusion with novel heat treatments // *International Journal of Fatigue*. 2024. Vol. 185. P. 108362. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108362.

References

1. Shanyavskiy A.A., Soldatenkov A.P. Large-scale levels of the fatigue limit of metals. *Fizicheskaya mezhomekhanika*, 2019, no. 1, pp. 44–53. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-11005.
2. Burago N.G., Nikitin I.S., Shanyavski A.A., Zhuravlev A.B. Durability estimations for in-service titanium compressor disks subjected to multiaxial cyclic loads in low- and very-high-cycle fatigue regimes. *Proceedings of 19th European Conference on Fracture* (Kazan, Russia, 26–31 Aug. 2012). Available at: <https://www.grouppofrattura.it> (accessed: February 11, 2024).
3. Belousov G.G., Nikitin A.D., Shanyavskiy A.A. Model of fatigue failure in operation of a titanium fan disk of the TA12-60 engine. *Nauchnyy vestnik MGTUGA*, 2013, no. 187, pp. 103–107.
4. Ravikovich Yu.A., Kholobtsev D.P., Arkhipov A.N., Shakhov A.S. Calculation and experimental study of the dynamics and strength of the main parts of a gas turbine engine taking into account geometric deviations. *Vestnik UGATU*, 2023, vol. 27, no. 1 (99), pp. 47–59.
5. Soloviev B.A., Kulandin A.A., Makarov N.V. *Design and flight operation of power plants*. Moscow: Transport, 1991, 256 p.
6. Pakhomenkov A.V. *Calculation and experimental forecasting of low-cycle durability and service life of gas turbine engine disks taking into account the influence of analytical and operational factors*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Rybinsk, 2020, 154 p.
7. Makarov P.V., Kolotnikov M.E., Vedeneev V.V., Abdukhakimov F.A. Comprehensive analysis of the dynamic behavior of compressor blades at the design stage. *Aviatsionnye dvigateli*, 2023, no. 3 (20), pp. 20–27.
8. Petukhov A.N. Problems of high-cycle fatigue of structural materials and gas turbine engine parts. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 3 (34), pp. 17–25. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-3-1(34)-17-25.
9. Inozemtsev A.A., Sandratsky V.L. *Gas turbine engines*. Perm: Aviadvigatel, 2006, 1204 p.
10. De Monicault J.-M., Guedou J.-Y., Soniak F. Issues and progress in manufacturing of aero titanium parts. *24th ITA: Titanium Conference Proceedings*. Las Vegas, 2008, p. 7.
11. Geary B., Bolam V.J., Jenkins S.L., Davies D.P. High temperature titanium sheet for helicopter exhaust applications. *8th Titanium World Conference*. London: Cambridge University Press, 1996, pp. 1638–1645.
12. Pavlova T.V., Kashapov O.S., Kalashnikov V.S., Kondrateva A.R. Industrial development of manufacturing large-size forgings from heat-resistant titanium alloy VT41 for welded assemblies of aircraft products. *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-39-57.
13. Makhutov N.A., Gdenini M.M. Study of generalized curves of static and cyclic deformation, damage and destruction. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2023, vol. 89, no. 5, pp. 46–54. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-5-46-55.
14. Kapustin V.I., Zakharchenko K.V., Cherepanova V.K., Shayapov V.R. Investigation of dissipative processes of VT6 alloy under fatigue. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 4 (69), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 01, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-4-96-111.
15. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Influence of average cycle stress on characteristics of low-cycle fatigue of high-temperature nickel alloy VZh175. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.

16. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Karanov V.A., Yushin V.D. Influence of the type of loading on high-cycle fatigue of heat-resistant alloys. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-96-104.
17. Duyunova V.A., Putyrskiy S.V., Arislanov A.A., Krokhina V.A., Shiryaev A.A. Analysis of the effect of heat treatment on the structure and mechanical properties of bars made of VT47 titanium alloy. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-26-34.
18. Kablov D.E., Panin P.V., Shiryaev A.A., Nochovnaya N.A. The use of ADL VAR L200 vacuum-arc furnace for ingots fabrication of high-temperature titanium aluminides base alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
19. Nochovnaya N.A., Shiryaev A.A. Features of the structural and phase composition, mechanical properties of metastable β -titanium alloy VT47 alloyed with silicon. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-51-60.
20. Dzunovich D.A., Lukina E.A., Yakovlev A.L. Influence of heat treatment parameters on producibility and mechanical properties of sheets made from high-strength titanium alloy VT23. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-3-10.
21. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
22. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
23. Kablov E.N., Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaya N.A. Development of a pilot industrial technology for the production of semi-finished products from pseudo- α titanium alloy VT41. *Titan*, 2016, no. 2 (52), pp. 33–42.
24. Shrestha R., Simsiriwong J., Shamsaei N. Fatigue behavior of additive manufactured 316L stainless steel under axial versus rotating-bending loading: Synergistic effects of stress gradient, surface roughness, and volumetric defects. *International Journal of Fatigue*, 2021, vol. 144, p. 106063. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106063.
25. Medvedev P.N., Kashapov O.S., Reshetilo L.P. Study of surface layers of titanium alloy VT41 after mechanical treatment. *Voprosy materialovedeniya*, 2022, no. 1 (109), pp. 54–63.
26. Derimow N., Benzing J., Newton D., Beamer C. Microstructural effects on the rotating bending fatigue behavior of Ti–6Al–4V produced via laser powder bed fusion with novel heat treatments. *International Journal of Fatigue*, 2024, vol. 185, p. 108362. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108362.

Информация об авторах

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

Рыжков Петр Валерьевич, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чучман Олег Викторович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Наприенко Сергей Александрович, начальник сектора, к.т.н., 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

Peter V. Ryzhkov, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Oleg V. Chuchman, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey A. Naprienko, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2024; получена после доработки 29.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.07.2024.
The article was submitted 22.02.2024; received in revised form 29.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 29.07.2024.