
Научная статья

УДК 620.178.3:669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-71-82

УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖАРОПРОЧНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТОТАХ НАГРУЖЕНИЯ

И.А. Ходинев¹, Е.В. Баранова¹

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

Аннотация. Исследовано влияние частоты нагружения на характеристики усталостной долговечности жаропрочного титанового сплава. Испытания на малоцикловую усталость (МЦУ) выполнены в условиях «жесткого» нагружения при температурах 20 и 400 °С. Испытания на многоцикловую усталость (МнЦУ) выполнены в условиях «мягкого» нагружения при комнатной температуре. Установлено, что влияние частоты нагружения на МЦУ наиболее значительно при повышенной температуре. Основное различие при фиксированном уровне нагружения МнЦУ наблюдается при значениях $>10^7$ циклов. С увеличением частоты нагружения увеличивается долговечность.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, «жесткое» нагружение, амплитуда полной деформации, частота нагружения, титановый жаропрочный сплав, многоцикловая усталость, $(\alpha + \beta)$ -сплав, кривые разупрочнения

Для цитирования: Ходинев И.А., Баранова Е.В. Усталостная долговечность жаропрочного титанового сплава при различных частотах нагружения // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-71-82.

Scientific article

FATIGUE LIFE OF A HEAT-RESISTANT TITANIUM ALLOY AT VARIOUS LOADING FREQUENCIES

I.A. Hodinev¹, E.V. Baranova¹

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 influence of loading frequency on the fatigue life characteristics of a heat-resistant titanium alloy has been studied. Low cycle fatigue (LCF) tests were performed under «severe» loading conditions at temperatures of 20 and 400 °C. High cycle fatigue tests (HCF) were performed under «mild» loading conditions at room temperature. It has been established that the effect of loading frequency on the LCF is the most significant at elevated temperatures. The main difference at a fixed level of loading of the HCF is observed in the interval from 10^7 cycles. With an increase in the frequency of loading, the durability increases.

Keywords: low-cycle fatigue, «hard» loading, total deformation amplitude, loading frequency, titanium superalloy, high-cycle fatigue, $(\alpha + \beta)$ -alloy, softening curves

For citation: Hodinev I.A., Baranova E.V. Fatigue life of a heat-resistant titanium alloy at various loading frequencies. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-71-82.

Введение

Жаропрочные титановые сплавы широко применяются в качестве материалов деталей газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2]. Нестационарное температурно-силовое нагружение узлов ГТД на стадиях запуска и остановки способно негативно влиять на ресурс всей конструкции. Испытание на малоцикловую усталость (МЦУ) при «жестком» нагружении в цикле моделирует режимы нагружения материала на этих стадиях. При оценке предельного состояния материалов ГТД при стационарных режимах работы, как правило, проводят испытания на МЦУ с выдержкой в каждом цикле нагружения [3–6]. Испытание на многоцикловую усталость (МнЦУ) обычно моделирует вибрационное воздействие. Переменные напряжения имеют сравнительно небольшую амплитуду, которая значительно меньше предела текучести. Многоцикловая усталость в большей степени определяет процесс разрушения вращающихся элементов узлов ГТД (лопатки, валы и шестерни) [7].

Известно, что интенсивность протекания пластической деформации титановых сплавов чувствительна к скорости деформирования [8]. Изменение продолжительности нагружения в цикле (и, как следствие, изменение скорости нагружения) может значительно повлиять на стадийность усталостного разрушения. На первой стадии под действием переменных напряжений происходят необратимые изменения в структуре металла, связанные с перемещением микродефектов вследствие локальной концентрации напряжений на случайных неоднородностях исходной структуры металла [9]. Изучение завершающей стадии усталостного разрушения в нагружаемых телах входит в область задач механики разрушения [10].

Влияние частоты нагружения на усталостную долговечность материалов ГТД отмечено в работах [11, 12]. Для титанового сплава Ti-5522S [13] установлено уменьшение долговечности при снижении частоты нагружения (при увеличении продолжительности цикла) в условиях повышенной температуры, что объясняется развитием процессов ползучести и высокотемпературного окисления, зависящих от времени. Уменьшение сопротивления усталости титановых сплавов при повышенных температурах со снижением частоты обусловлено растрескиванием вдоль границ α - и β -фаз. Предложенный механизм снижения усталостной долговечности связан с протяженностью границ раздела α - и β -фаз, которые насыщаются кислородом, имеющим высокую диффузионную подвижность при высоких температурах испытаний. Исследование влияния длительности выдержки при максимальном значении нагрузки на усталостную долговечность и трещиностойкость показало существенное ухудшение свойств. Проведению данных исследований способствовали случаи преждевременного разрушения вращающихся элементов узлов ГТД, вызванного стационарным режимом работы двигателя.

Основное количество работ по исследованию влияния частоты нагружения титановых сплавов сосредоточено в области определения усталостных свойств при долговечности $>10^5$ циклов [14, 15]. Для двухфазного ($\alpha + \beta$)-сплава BT23 и псевдо- α -сплава BT18У установлена общая закономерность возрастания предела выносливости с увеличением частоты нагружения. В работе [14] для сплава BT6 показано минимальное влияние частоты (f : 120 и 600 Гц, 20 кГц) на усталостную долговечность. Основное различие авторы связывают с местом зарождения усталостной трещины – с увеличением частоты очаг зарождения стремится к поверхности.

Проблема усталости материалов, долгие годы сохраняющая свою актуальность, серьезно проявилась в последние годы при появлении исследований, посвященных построению кривой усталости в широком диапазоне скоростей нагружения и долговечностей. Необходимость расширения базы испытаний связана с экономической эффективностью

методов оценки, поэтому уточнение расчетных методик при сокращении продолжительности испытаний позволит снизить себестоимость усталостных испытаний.

Цель данной работы – исследование влияния частоты нагружения на долговечность титанового сплава состава Ti-6Al-4V при комнатной и повышенной (400 °C) температурах.

Материалы и методы

Для исследования выбран модельный титановый сплав – аналог сплава Ti-6Al-4V, содержащий, % (по массе): 4 V; 6 Al; 0,3 Fe; 0,2 O; 0,08 C; 0,05 N; 0,015 H; Ti – основа. Рассматриваемый сплав относится к группе титановых деформируемых сплавов для изготовления целого ряда конструктивных элементов летательных аппаратов, работающих в широком интервале температур – от –196 до +450 °C. Основу сплава составляет α -фаза различной морфологии, имеющая гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку. Частицы α -фазы разделены прослойками β -фазы с объемноцентрированной кристаллической решеткой. Микроструктура материала – типичная для деформированного в двухфазной области и отожженного состояния, дуплексного типа (рис. 1).

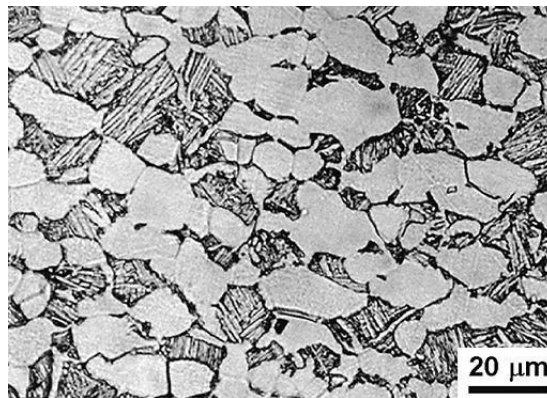


Рис. 1. Микроструктура модельного сплава Ti-6Al-4V

Испытания на МЦУ выполнены при контроле амплитуды полной (упругой и пластической) деформации $\Delta\varepsilon/2 = 0,3\text{--}0,7\%$, синусоидальном отнулевом ($R_\varepsilon = 0$) цикле нагружения, частоте $f = 1\text{--}2$ Гц и температурах 20 и 400 °C с применением динамической сервогидравлической испытательной машины и записью петель упругопластического гистерезиса. Испытаны гладкие цилиндрические образцы с диаметром рабочей части 5 мм и ее длиной 15 мм, их геометрическая форма и поверхность соответствовали требованиям ГОСТ 25.502–79 и ASTM E606. Нагрев образцов производили в печи сопротивления с тремя зонами нагрева, что способствует плавному равномерному распределению температурного поля. Перед испытаниями производили настройку обратной связи (настройка PID-параметров) машины с целью установления полного контроля над параметрами цикла. Это необходимо для того, чтобы согласовать выходной сигнал контроллера с выходным сигналом управляющего датчика. При рассогласовании формируется сигнал ошибки, который должен быть усилен пропорциональным коэффициентом. Для этого в захваты установили образец и провели пробные циклические нагружения, в течение которых подбирался коэффициент пропорциональности для обеспечения соответствия заданной и реализуемой на испытательной машине амплитуде осевой деформации. Терминология и особенности режимов нагружения изложены в работах [16, 17].

Объем выборки при каждой температуре составлял не менее 15 образцов. По каждой выборке построены кривые усталости с вероятностью разрушения P_f : 5; 50 и 95 %. Значения амплитуд напряжений и пластической деформации (ширина петли гистерезиса) взяты в середине испытания – при $N_f/N_i = 0,5$, где N_f – число циклов до разрушения; N_i – i -й цикл нагружения. Полученные данные аппроксимированы степенным уравнением, которое после логарифмирования принимает вид:

$$\lg \frac{\Delta\sigma}{2} = \lg K + n \lg \frac{\Delta\varepsilon_p}{2}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma/2$ – амплитуда напряжений; $\Delta\varepsilon_p/2$ – амплитуда пластической деформации; n , K – соответственно показатель и коэффициент усталостного упрочнения.

Определенные методом наименьших квадратов коэффициенты уравнения (1) приведены в таблице.

Результаты расчета коэффициентов уравнения (1)

Температура испытания, °С	Частота синусоидального нагружения, Гц	K , МПа	n
20	1	1059	0,07
	2	7060	0,39
400	1	601	0,04
	2	658	0,06

Различные скорости нагружения подразумевают различный наклон прямых, соединяющих точку начала нагружения и локальный максимум синусоидального нагружения. В качестве примера на рис. 2 приведено схематичное представление двух скоростей нагружения при одной амплитуде деформации.

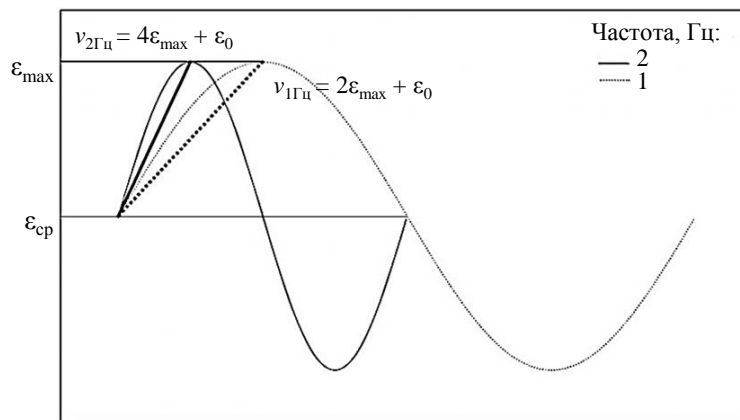


Рис. 2. Различные скорости деформирования при малоциклового усталости

Для испытаний на МнЦУ при повышенной температуре (по схеме одноосного нагружения) использовали магнитно-резонансную испытательную машину с программным обеспечением для автоматизации испытаний. Диапазон частот испытаний на машине находится в пределах 50–400 Гц и зависит от жесткости образца и различной присоединенной массы в самой машине. Механические испытания проводили при контроле силы с синусоидальной формой волны прикладываемой нагрузки.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18].

Результаты и обсуждение

Кривая усталости при комнатной температуре и двух частотах нагружения не выявила однозначного результата при изучении влияния частоты на долговечность (рис. 3). В условиях упругопластического деформирования – от 10^3 до 10^4 циклов – наблюдается сравнительно меньшая долговечность для образцов, разрушившихся при частоте 2 Гц. Как известно, напряжение течения титановых двухфазных сплавов чувствительно к скорости нагружения: при увеличении скорости оно возрастает. В условиях преобладания упругой деформации на участке $>10^4$ циклов общей закономерности о влиянии частоты на долговечность не выявлено.

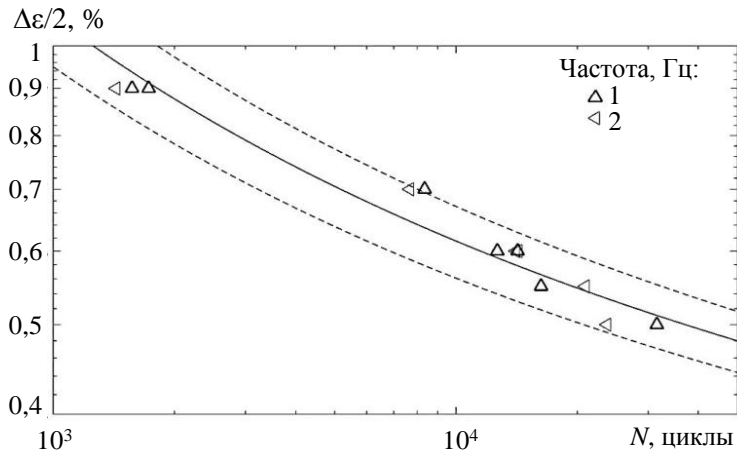


Рис. 3. Кривая малоциклового усталости при комнатной температуре

При этом в работе [17] испытания на МЦУ сплава, аналогичного сплаву Ti-6Al-4V ELI, проведены по треугольному циклу с частотой 0,2 Гц, которая в 5–10 раз меньше частоты, используемой в данном исследовании (рис. 4).

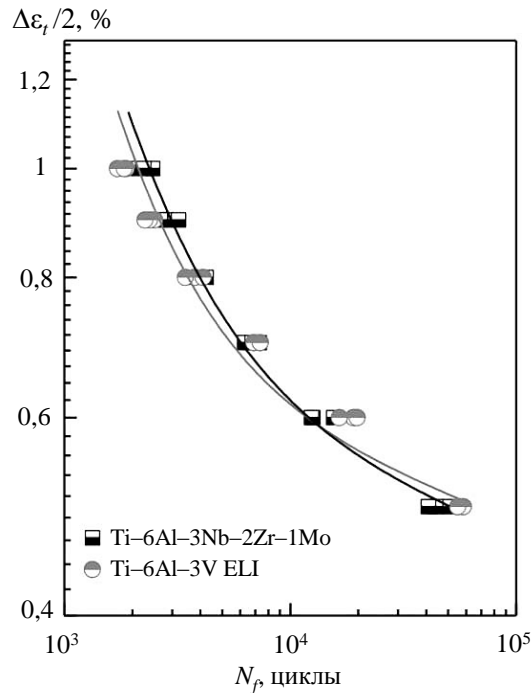


Рис. 4. Кривая малоциклового усталости сплава Ti-6Al-4V ELI при комнатной температуре [19]

При сравнении долговечности на уровнях общей деформации, совпадающими с уровнями в текущем исследовании, показано отсутствие влияния продолжительности цикла и скорости нагружения на усталостную долговечность в режиме МЦУ при комнатной температуре.

Помимо испытаний сплава Ti–6Al–4V ELI, в работе [20] исследован сплав Ti–6Al–4V, полученный селективным лазерным сплавлением, при частоте нагружения 0,1 Гц. Сравнение долговечности на уровнях общей деформации 0,9 и 0,7 % также показывает отсутствие влияния продолжительности цикла и скорости нагружения на усталостную долговечность.

При температуре 400 °С зависимость долговечности (рис. 5) сплава от частоты нагружения более явная: результаты при частоте 2 Гц расположены ближе к кривой минимальных значений, что справедливо для всех амплитуд деформации.

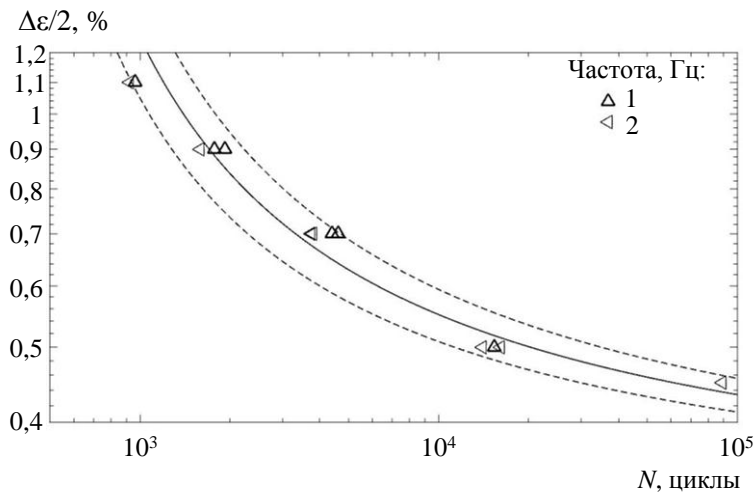


Рис. 5. Кривая малоциклового усталости при повышенной температуре

В процессе испытания образцов в каждом цикле деформирования осуществляли запись петель упругопластического гистерезиса. Измерены и проанализированы возникающие напряжения, а также величины накопленной пластической деформации, соответствующие ширине петли гистерезиса. Характер разупрочнения сплава при МЦУ зависит от температуры и частоты нагружения (рис. 6).

При этом для комнатной температуры можно выделить стадию интенсивного упрочнения с последующей релаксацией на следующей стадии в интервале относительной долговечности $N_i/N_f \leq 0,1$, стационарную стадию при $0,1 < N_i/N_f \leq 0,9$, на которой амплитуда напряжений стабилизируется. Далее происходит резкое снижение напряжения, что связано с образованием и распространением магистральной трещины по сечению образца. Стадийность разупрочнения сплава отмечена при всех условиях испытания, кроме испытаний при $\Delta\epsilon/2 = 0,5$ %. В этом случае амплитуда напряжений устанавливается практически с начала нагружения и остается стабильной вплоть до конца испытания, а далее она резко снижается в момент разрушения образца. При повышенной температуре можно выделить стадию интенсивного разупрочнения с последующим упрочнением вплоть до образования магистральной трещины.

Напряжение, при котором реализована стадийность разрушения сплава, зависит от частоты нагружения (рис. 6). Так, в случае испытания при двух частотах (1 и 2 Гц) в условиях комнатной температуры и при амплитуде деформации $\Delta\epsilon/2 = 0,9$ %, различие

между амплитудами напряжений составляет 30 МПа (для $N_p/2 = 0,5$). При $\Delta\varepsilon/2 = 0,6\%$ различие уменьшается и составляет 10 МПа, а при $\Delta\varepsilon/2 = 0,5\%$ – практически исчезает. При повышенной температуре с увеличением частоты нагружения наблюдается увеличение амплитуды напряжений на 20 МПа (для $N_p/2 = 0,5$) на уровнях деформации, соответствующих медианной долговечности – от 10^3 до 10^4 циклов. При $\Delta\varepsilon/2 = 0,5\%$ в области больших долговечностей ситуация обратная: с увеличением частоты нагружения наблюдается уменьшение амплитуды напряжений, которая составила 5 МПа (рис. 6, б).

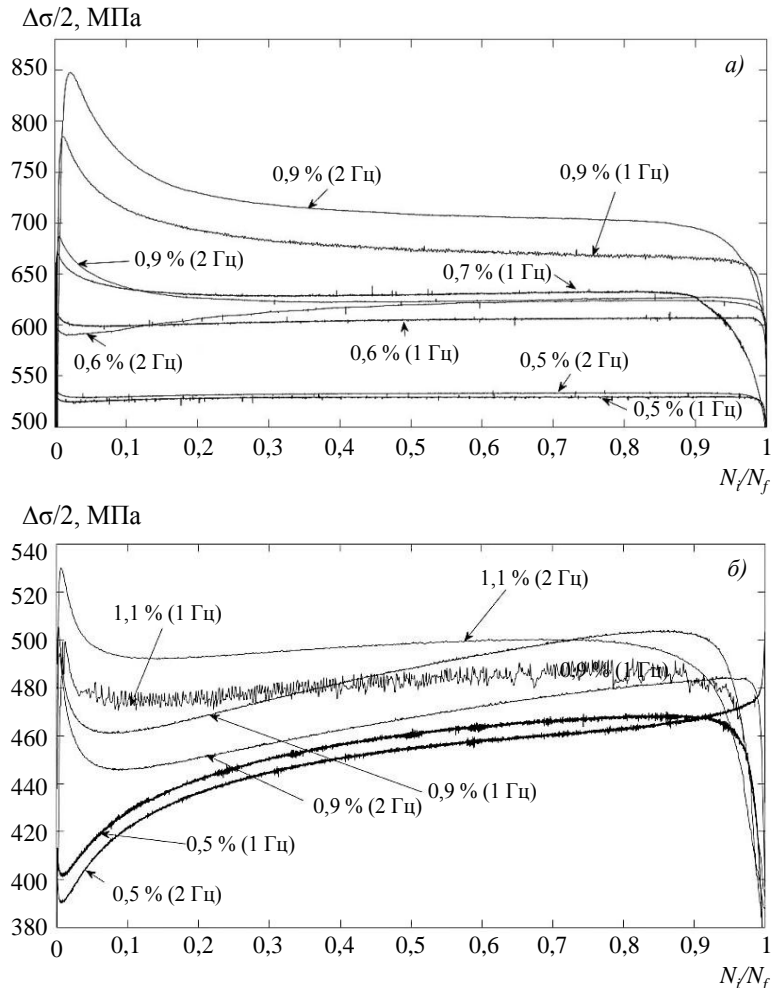


Рис. 6. Кривые разупрочнения при комнатной (а) и повышенной температурах (б)

Повышенная прочность в области высокоамплитудных деформаций обычно связана с увеличением плотности дислокаций и их взаимодействием на границах α - и β -фаз. Стабильный отклик амплитуды напряжений в области низкоамплитудной деформации обычно обусловлен конкуренцией механизмов упрочнения и разупрочнения: размножения и аннигиляции дислокаций и локализацией пластической деформации на устойчивых полосах скольжения [21]. Предполагается, что интенсивность упрочнения/разупрочнения напряжений определяется главным образом подвижностью дислокаций с образованием субструктур [22].

Результаты обработки параметров петель упругопластического гистерезиса в виде зависимостей амплитуды пластической деформации от амплитуды напряжений для двух частот и двух температур испытаний показаны на рис. 7.

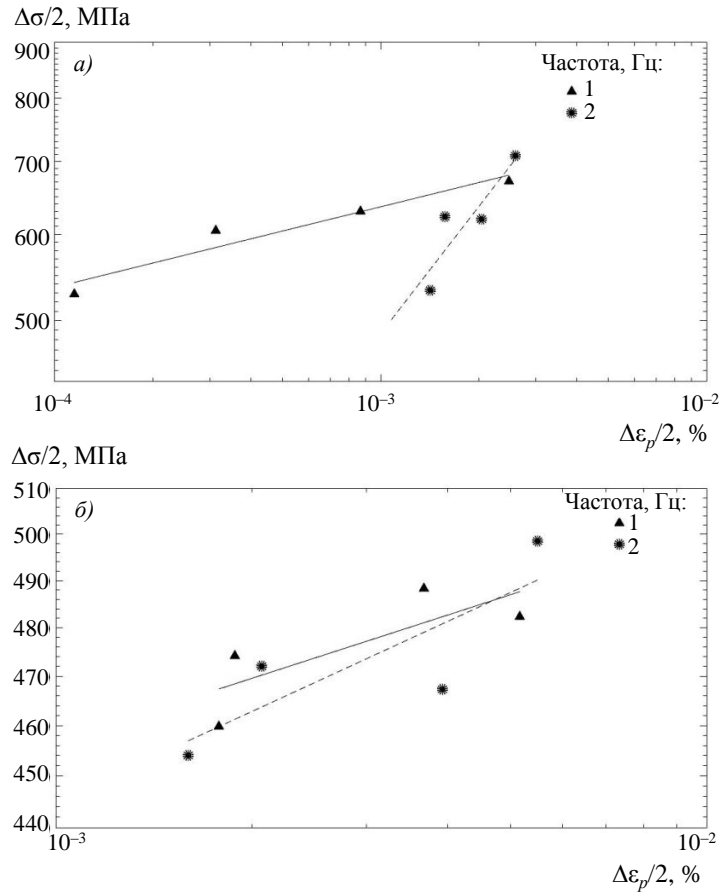


Рис. 7. Зависимости амплитуды напряжения от амплитуды пластической деформации при температурах 20 (а) и 400 °С (б) и различных частотах деформирования

При комнатной температуре наблюдается заметное увеличение интенсивности напряжений при увеличении циклической пластичности (ширины петли гистерезиса) с увеличением частоты деформирования. При повышенной температуре наклон кривой с увеличением частоты деформирования изменяется незначительно, что указывает на схожесть процессов протекания пластической деформации.

Результаты, полученные при частоте 300 Гц, расположены значительно правее относительно медианной кривой МнЦУ (рис. 8).

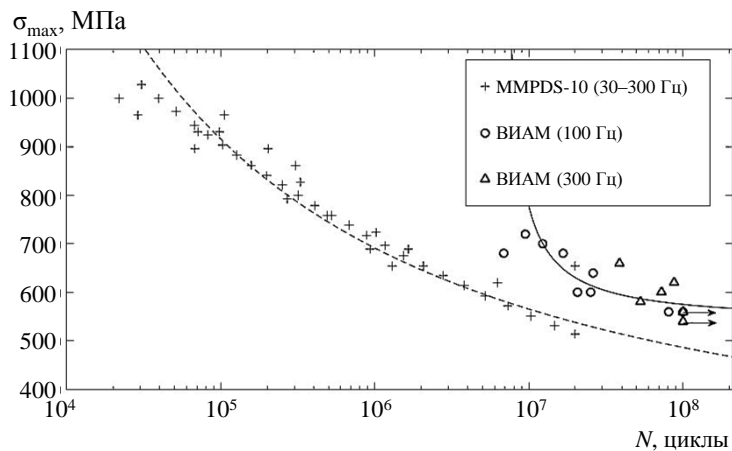


Рис. 8. Кривая многоциклового усталости при комнатной температуре

Частота оказывает существенное влияние на усталостную долговечность. При одинаковой амплитуде напряжений усталостная долговечность увеличивается с увеличением частоты. Предположительно это связано с тем, что при более низкой частоте дислокации быстрее преодолевают препятствия, чем при высокой [22], что в свою очередь увеличивает накопление локальной пластической деформации и приводит к уменьшению усталостной долговечности. Результаты, полученные из справочника MMPDS-10, указывают на отсутствие влияния частоты на долговечность в диапазоне от 10^5 до 10^7 циклов. Результаты, полученные в данном исследовании, расположены в интервале от 10^7 до 10^8 циклов. Известно, что данный интервал циклов для титановых сплавов соответствует разрушению по механизму гигацикловой усталости [14]. Неоднородность структуры исследуемого материала определяет его механическое поведение, проявляющееся на начальных стадиях нагружения локализованных зон пластической деформации в вершинах поверхностных дефектов. Образование дислокационных структур и их взаимодействие с границами фаз на данном интервале долговечностей изучают методами акустической эмиссии и средствами атомистического моделирования. Указанные методы позволяют проследить процессы атомного масштаба: зарождение трещины в зависимости от условий расположения дислокаций и кривизну фронта распространения усталостной трещины.

Заключения

Кривые МЦУ при комнатной и повышенной температурах свидетельствуют о негативном влиянии скорости нагружения в начале испытания.

Сравнение амплитуд напряжений по кривым разупрочнения в условиях комнатной и повышенной температур при различных частотах нагружения показало, что уменьшение продолжительности цикла способствует повышению усталостной долговечности. При малых нагрузках и большой долговечности данное наблюдение не подтверждается.

Результаты для разрушенных образцов при МнЦУ, полученные при частоте 300 Гц, расположены значительно правее относительно медианной кривой. При одинаковой амплитуде напряжений усталостная долговечность увеличивается с увеличением частоты. Предположительно это связано с тем, что при более низкой частоте дислокации быстрее преодолевают препятствия, чем при высокой, что в свою очередь увеличивает накопление локальных пластических деформаций и приводит к уменьшению усталостной долговечности.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 3. С. 47–54.
2. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
3. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // Труды ВИАМ. 2018. № 9 (69). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
4. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Бакрадзе М.М., Горбовец М.А., Гольдберг М.А. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 в условиях упругопластической деформации // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 7. С. 27–33.
5. Nazmy M.Y. High temperature low cycle fatigue of IN 738 and application of strain range partitioning // Metallurgical Transactions A. 1983. Vol. 14. P. 449–461.

6. Lee Y.-L., Barley M.E., Kang H.-T. Metal fatigue analysis handbook: practical problem-solving techniques for computer-aided engineering. Elsevier Inc., 2012. P. 222–223.
7. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
8. Проходцева Л.В., Ерасов В.С., Лаврова О.Ю., Лавров А.В. Влияние формы цикла на усталостные свойства и микростроение изломов титанового сплава ВТ3-1 // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2 (23). С. 54–58.
9. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Многоуровневое масштабное комплексное исследование деформирования металлических материалов // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
10. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Деформация и разрушение как процессы изменения объема, площади поверхности и линейных размеров в нагружаемых телах // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.
11. Sun C., Li Y., Huang R. et al. Crack initiation mechanism and fatigue life of titanium alloy Ti–6Al–2Sn–2Zr–3Mo–X: Effects of stress ratio and loading frequency // Materials Science and Engineering: A, 2020. Vol. 798. P. 140265. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140265.
12. Krasovskii A.Y., Petrov Y.N., Nadezhdin G.N. Fatigue damage to a pseudo- α -titanium alloy in the 10–33-Hz frequency range // Strength of Materials. 1982. Vol. 14. P. 1320–1323. DOI: 10.1007/BF00770126.
13. Eylon D., Bartel T.L., Rosenblum M.E. High Temperature Low Cycle Fatigue in Beta Processed Ti–5Al–5Sn–2Zr–2Mo–0.25S // American society for metals and the metallurgical society of AIME. 1980. Vol. 11A. P. 1361–1367. DOI: 10.1007/BF02653490.
14. Matokhnyuk L.E., Voinalovich A.V., Khlyapov A.A., Bulgakova S.G., Artyushina V.P. Fatigue limit of the titanium alloy VT23 in tests with high loading frequency // Metal Science and Heat Treatment. 1988. Vol. 30. P. 786–789.
15. Кузьменко В.А., Матокхнюк Л.Е., Писаренко Г.Г. Усталостные испытания при высоких частотах. Киев, 1979. 335 с.
16. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
17. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
18. 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.
19. Wang Q., Ren J.Q., Xin C. et al. Low cycle fatigue behavior of near-alpha titanium alloys used in deep-driving submersible: Ti–6Al–3Nb–2Zr–1Mo vs. Ti–6Al–4V ELI // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 934. P. 167856.
20. Bai C., Lan L., Xin R. et al. Microstructure evolution and cyclic deformation behavior of Ti–6Al–4V alloy via electron beam melting during low cycle fatigue // International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 159. P. 106784. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106784.
21. Polak J. Cyclic plasticity and low cycle fatigue life of metals. Amsterdam: Elsevier, 1991. С. 123.
22. Sharkeev Y., Eroshenko A., Mairambekova A. Features of the fracture of the Ti–45 wt.% Nb alloy in ultrafine-grained state at gigacycle fatigue // Procedia Structural Integrity. 2023. Vol. 47. P. 849–854. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.034.

References

1. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomborg B.S., Sidorov V.V. Priority directions of development of technologies for production of heat-resistant materials for aircraft engine building. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*, 2013, no. 3, pp. 47–54.
2. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
3. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Ryzhkov P.V. Equipment for testing carrying out the strain-controlled low-cycle fatigue. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 03, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
4. Belyaev M.S., Terentyev V.F., Bakradze M.M., Gorbovets M.A., Goldberg M.A. Low-cycle fatigue of heat-resistant alloy VZh175 under elastic-plastic deformation. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2014, no. 7, pp. 27–33.
5. Nazmy M.Y. High temperature low cycle fatigue of IN 738 and application of strain range partitioning. *Metallurgical Transactions A*, 1983, vol. 14, pp. 449–461.
6. Lee Y.-L., Barley M.E., Kang H.-T. *Metal fatigue analysis handbook: practical problem-solving techniques for computer-aided engineering*. Elsevier Inc., 2012, pp. 222–223.
7. Inozemtsev A.A., Bashkatov I.G., Koryakovtsev A.S. Titanium alloys in products developed by Aviadvigatel JSC. *Modern titanium alloys and problems of their development*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2010, pp. 43–46.
8. Prohodceva L.V., Erasov V.S., Lavrova O.Yu., Lavrov A.V. Influence of form of cycle on fatigue properties and microstructure of breaks of VT3-1 titanium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 2, pp. 54–58.
9. Erasov V.S., Oreshko E.I., Lutsenko A.N. Multilevel large-scale complex research of deformation of metal materials. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 21, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
10. Erasov V.S., Oreshko E.I. Deformation and destruction as processes of change of volume, the areas of a surface and the linear sizes in loaded bodies. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.
11. Sun C., Li Y., Huang R. et al. Crack initiation mechanism and fatigue life of titanium alloy Ti-6Al-2Sn-2Zr-3Mo-X: Effects of stress ratio and loading frequency. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 798, p. 140265. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140265.
12. Krasovskii A.Y., Petrov Y.N., Nadezhdin G.N. Fatigue damage to a pseudo- α -titanium alloy in the 10–33-Hz frequency range. *Strength of Materials*, 1982, vol. 14, pp. 1320–1323. DOI: 10.1007/BF00770126.
13. Eylon D., Bartel T.L., Rosenblum M.E. High Temperature Low Cycle Fatigue in Beta Processed Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo-0.25S. *American society for metals and the metallurgical society of AIME*, 1980, vol. 11A, pp. 1361–1367. DOI: 10.1007/BF02653490.
14. Matokhnyuk L.E., Voinalovich A.V., Khlyapov A.A., Bulgakova S.G., Artyushina V.P. Fatigue limit of the titanium alloy VT23 in tests with high loading frequency. *Metal Science and Heat Treatment*, 1988, vol. 30, pp. 786–789.
15. Kuzmenko V.A., Matokhnyuk L.E., Pisarenko G.G. *Fatigue tests at high frequencies*. Kyiv, 1979, 335 p.
16. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
17. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.

18. 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». *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Wang Q., Ren J.Q., Xin C. et al. Low cycle fatigue behavior of near-alpha titanium alloys used in deep-driving submersible: Ti–6Al–3Nb–2Zr–1Mo vs. Ti–6Al–4V ELI. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, vol. 934, p. 167856.
20. Bai C., Lan L., Xin R. et al. Microstructure evolution and cyclic deformation behavior of Ti–6Al–4V alloy via electron beam melting during low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 2022, vol. 159, p. 106784. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2022.106784.
21. Polak J. *Cyclic plasticity and low cycle fatigue life of metals*. Amsterdam: Elsevier, 1991. С. 123.
22. Sharkeev Y., Eroshenko A., Mairambekova A. Features of the fracture of the Ti–45 wt.% Nb alloy in ultrafine-grained state at gigacycle fatigue. *Procedia Structural Integrity*, 2023, vol. 47, pp. 849–854. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.034.

Информация об авторах

Ходинев Иван Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Баранова Екатерина Валерьевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ivan A. Hodinev, Head of laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ekaterina V. Baranova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 02.04.2024; получена после доработки 17.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.07.2024.
The article was submitted 02.04.2024; received in revised form 17.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 17.07.2024.