

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-427-435>

УДК 539.4.013.3:669

Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов

Канд. техн. наук, доц. В. В. Мыльников¹⁾

¹⁾Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (Нижегород, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Выполнены испытания на усталость конструкционных сталей и титанового сплава при различных частотах циклического нагружения, в результате которых выявлены закономерности изменения показателей сопротивления усталости и стабильности поведения испытанных материалов. Изменение частоты циклического нагружения влияет на продолжительность разового (в течение одного цикла) пребывания материала в нагруженном состоянии, что сказывается на его долговечности. Помимо этого, с ростом частоты циклов нагрузки скорость деформирования возрастает, а время нарастания напряжения уменьшается, одновременно увеличиваются искажения кристаллической решетки за счет сокращения времени развития процесса разупрочнения. Данный процесс сопровождается ростом интенсивности дробления зерен на фрагменты и блоки и их разориентировкой. Испытания на циклическую прочность образцов исследуемых материалов проводили при различных частотах и комнатной температуре по следующим схемам нагружения: консольный циклический поперечный изгиб плоского образца; консольный изгиб с вращением цилиндрического образца; осевое растяжение по пульсирующему циклу. Для анализа и оценки работоспособности и стабильности испытанных материалов применяли количественные оценки показателя сопротивления усталости в виде тангенса наклона левой ветви кривой усталости к оси циклов. Для обработки полученных результатов воспользовались методами математической статистики. Графические зависимости кривых усталости строили в логарифмических координатах, что позволило получить спрямление аппроксимирующих линий экспериментальных данных. В ходе исследований установлено: частота нагружения имеет неоднозначное влияние на сопротивление усталости из-за различий материалов в своей реакции на изменение спектра нагрузок в разных зонах усталостного процесса, но при этом обнаружено, что повышение усталостной прочности приводит к уменьшению наклона кривой усталости независимо от снижения или увеличения частоты нагрузки. Предложен новый подход к оценке циклической прочности и долговечности материалов, который включает в себя систему параметров из относительного коэффициента ограниченной выносливости, коэффициента корреляции и тангенса наклона кривой усталости. Обозначена динамика поведения реальных деталей машин и конструкций, изготовленных из этих сплавов, в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: частота циклов нагружения, сопротивление усталости, прочность, долговечность, стабильность поведения, конструкционная сталь, титановый сплав

Для цитирования: Мыльников, В. В. Влияние частоты нагружения на усталость конструкционных материалов / В. В. Мыльников // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 427–435. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-427-435>

Influence of Loading Frequency on Fatigue of Construction Materials

V. V. Mylnikov¹⁾

¹⁾Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (Nizhny Novgorod, Russian Federation)

Abstract. Investigations have been carried out in respect of structural steel and titanium alloy fatigue at various cyclic loading frequencies and these investigations have made it possible to reveal regularities in changes of parameters pertaining to fatigue resistance and stability behaviour of the tested materials. A change in cyclic loading frequency affects duration of a single (during one cycle) stay of the material in the loaded state and it has an impact on its durability. In addition, with an increase in frequency of load cycles, deformation rate becomes higher, and stress build-up time is decreasing, while distortion of a crystal lattice is increasing due to reduction of time for development of a weakening process. This process is accompanied by an increase in intensity of grain crushing into fragments and blocks, and their disorientation. Tests on cyclic strength of the studied material samples have been carried out at various frequencies and at a room temperature according to the following loading schemes: cantilever cyclic transverse bending of a flat sample; cantilever bending with rotation of a cylindrical sample;

Адрес для переписки

Мыльников Владимир Викторович
Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет
ул. Ильинская, 65,
603950, г. Нижний Новгород, Российская Федерация
Тел.: +7 831 430-17-74
mrmylnikov@mail.ru

Address for correspondence

Mylnikov Vladimir V.
Nizhny Novgorod State University
of Architecture and Civil Engineering
65 Il'inskaya str.,
603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation
Tel.: +7 831 430-17-74
mrmylnikov@mail.ru

axial tension on a pulsating cycle. Quantitative estimates of a fatigue resistance index in the form of slope tangent in a left branch of the fatigue curve to a cycle axis have been used in order to analyze and evaluate performance and stability of the tested materials. Methods for mathematical statistics have been applied to process the obtained results. Graphic dependences of fatigue curves have been plotted in logarithmic coordinates that allowed to obtain straightening of approximating lines for experimental data. The investigations have revealed that loading frequency has an ambiguous effect on fatigue resistance due to some differences in materials in respect of their reaction to changes in a load spectrum within different areas of the fatigue process, but at the same time it has been found that an increase in fatigue strength leads to a slope decrease in the fatigue curve regardless of a decrease or an increase in a load frequency. The paper proposes a new approach to assess a cyclic strength and durability of materials, and it comprises a system of parameters including a relative coefficient of limited endurance, a correlation coefficient and a slope tangent of the fatigue curve. Behavior dynamics for real machine parts and structures made of these alloys under operating conditions has been indicated in the paper.

Keywords: frequency of loading cycles, fatigue resistance, strength, durability, stability of behavior, structural steel, titanium alloy

For citation: Mylnikov V. V. (2019) Influence of Loading Frequency on Fatigue of Construction Materials. *Science and Technology*, 18 (5), 427–435. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-427-435> (in Russian)

Введение

Изучение закономерностей сопротивления усталости конструкционных материалов имеет первостепенное значение при прогнозировании прочности, долговечности и остаточного ресурса деталей машин и конструкций. На прочностные параметры сплавов при усталостных испытаниях влияют многие факторы, такие как температура, асимметрия нагружения, масштабный эффект, частота, шероховатость поверхности, концентрация напряжений и т. д. При этом каждый фактор может испытывать комплексное взаимодействие действующих одновременно с ним других факторов, которые могут как усиливать его действие, так и ослаблять или вообще исключать его влияние на развитие процесса повреждений. При тщательном изучении характеристик изменения показателей сопротивления усталости с одновременным учетом всех факторов и различных схем нагружений возникают значительные трудности, поэтому данный процесс удобнее разбить на экспериментально-теоретическое изучение отдельных факторов. В статье исследовался фактор частоты циклического нагружения на прочность и долговечность широко используемых конструкционных материалов.

Распространено мнение некоторых исследователей, что частота циклов нагрузки при нормальных условиях не оказывает существенного влияния на сопротивление усталости металлов и сплавов [1, 2]. Другая группа ученых придерживается мнения, что увеличение частоты нагружения неизменно приводит к повышению циклической прочности [3–5]. Кроме того, изменение частоты циклического нагружения влияет на продолжительность разового (в течение одного цикла) пребывания материала в нагруженном состоянии, что отражается на долговечности [6]. Возрастание частоты нагрузки приводит к росту скорости деформирования

материала, при этом время нарастания напряжения уменьшается, одновременно возрастают искажения кристаллической решетки за счет сокращения времени развития процесса разупрочнения. Данный процесс сопровождается ростом интенсивности дробления зерен на фрагменты и блоки и их разориентировкой. Парис [7], исследовавший некоторые частоты в интервале между 4 и 100 Гц, сделал заключение, что скорость циклического нагружения имеет незначительное влияние на рост усталостной трещины в умеренных условиях внешней среды, но другие исследования (Schijve), наоборот, указывают на ускорение роста при уменьшении частоты. Из этого следует, что частота нагружения имеет неоднозначное влияние на сопротивление усталости из-за различий материалов в своей реакции на изменение спектра нагрузок в разных зонах усталостного процесса [8–10].

Таким образом, анализ российских и иностранных публикаций показывает, что однозначного понимания особенностей влияния фактора частоты циклов на усталость на данный момент не существует [10].

Результаты исследований на усталость, изданные в виде научных статей и монографий, касаются в большей степени высокочастотных спектров нагружения и чаще всего тех частот, при которых проявляются вибрации узлов и деталей различных машин. Однако очень часто детали машин и элементы конструкций, например предохранительные мембраны, колонная и теплообменная аппаратура, прокатные станы, преимущественно используемые в металлургическом и химическом машиностроении, работают длительное время с весьма низкой частотой нагружения – до 5,0 Гц. Этот спектр нагружения является малоизученным ввиду большой продолжительности испытания. Так, для достижения наработки одного образца сравнительной базы 10^6 циклов при частоте 2 Гц уходит 139 ч непрерывной работы установки.

Обычно при расчетах действительных запасов циклической прочности пределы выносливости сплавов выбирают по значениям из металлургических справочников, полученных в основном при вращении с изгибом образцов на стандартной базе испытаний при частотах 50,0 Гц и более (до 166,7 Гц). Поэтому для расчета действительных запасов усталостной прочности в условиях низкочастотных диапазонов эксплуатации деталей необходимо вводить поправочный коэффициент на влияние частоты циклов. Изложенное доказывает потребность в проведении исследований усталостной прочности конструкционных материалов в пределах от долей герц до 5,0 Гц, что и явилось мотивацией для проведения настоящего исследования с целью определения влияния частоты нагружения и схемы нагрузки на динамику изменения показателей сопротивления усталости и стабильности поведения конструкционных материалов в сопоставлении с данными, полученными при испытаниях из стандартного диапазона частот.

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследований были выбраны используемые в машино- и авиационном сплавы, представленные в табл. 1. Так, например, стали 40 и 40X нашли широкое применение для изготовления валов и шестерен в узлах машин и аппаратов, работающих с низкой частотой циклов, с учетом чего был выбран спектр нагружения в представленном исследовании. Титановый сплав ОТ-4-1 и сталь

30ХГСН2А часто используются в авиационной промышленности. В частности, на авиационных предприятиях Нижнего Новгорода изготавливают рычаги шасси самолета из стали 30ХГСН2А, работающие при частотах нагружения от 0,17 Гц.

Таблица 1

Исследуемые сплавы и виды нагружения
Investigated alloys and types of loading

Сплав	Частота циклов ω , Гц	Предел прочности σ_b , МПа	Вид испытания
Сталь 40X	2,00	920	КИВЦО
	2,70	920	
	100,00	920	
Сталь 40	2,00	780	
	2,70	780	
	46,70	780	
ОТ-4-1	1,00	722	КИВЦО
	37,00	722	
Сталь 30ХГСН2А	0,17	1800	ОРПЦ
	0,17	1280	
	40,00	1800	
	40,00	1280	
	3,33	1500	КЦПИПО
50,00	1500		

Примечание. КИВЦО – консольный изгиб вращающегося цилиндрического образца; ОРПЦ – осевое растяжение по пульсирующему циклу; КЦПИПО – консольный циклический поперечный изгиб плоского образца.

Испытания образцов на усталость проводили при комнатной температуре 20 °С по режимам нагружения, показанным на рис. 1.

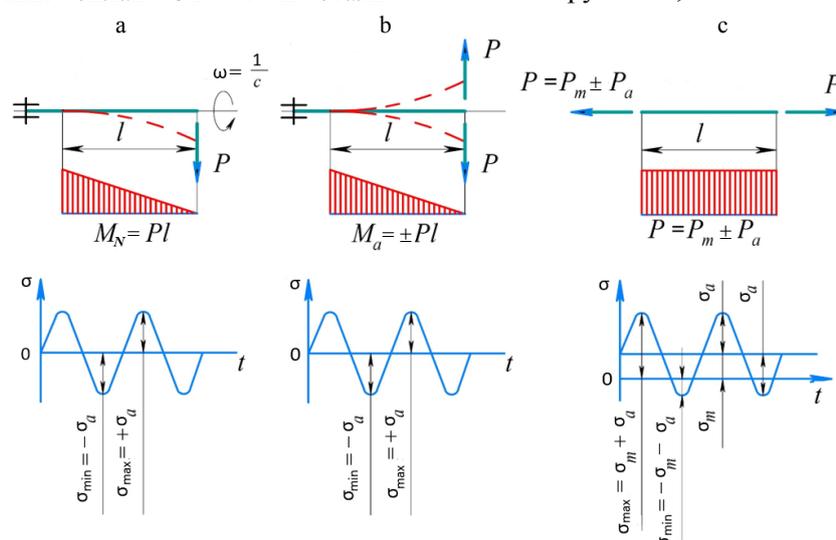


Рис. 1. Схематическое изображение видов нагружения образцов при усталостных испытаниях:

- a – консольный изгиб вращающегося цилиндрического образца;
b – консольный циклический поперечный изгиб плоского образца; c – осевое растяжение по пульсирующему циклу

Fig. 1. Schematic representation of loading types for specimens during fatigue tests:

- a – cantilever bending of rotating cylindrical specimen;
b – cantilever cyclic transverse bending of flat specimen; c – axial extension in pulsating cycle

С целью анализа и оценки работоспособности и стабильности испытанных материалов применяли параметры, приведенные ниже.

Для количественной оценки использовали значения показателя сопротивления усталости в виде наклона кривой усталости $\text{tg}\alpha_w$ к оси количества циклов N

$$\text{tg}\alpha_w = \frac{d \lg \sigma}{d \lg N}, \quad (1)$$

где σ – циклическое напряжение; N – количество циклов.

В [11] отмечено, что чем больше повреждаемость материала в условиях циклического нагружения, тем круче график зависимости количества циклов от прикладываемого напряжения. Показателем подобных изменений принят тангенс угла между осью абсцисс и аппроксимационной линией усталости – $\text{tg}\alpha_w$. Физический смысл $\text{tg}\alpha_w$ раскрывается в том, что величина противолежащего катета в рассматриваемом случае представляет собой напряжение, при котором работал материал, а прилежащего – количество циклов, которое выдержали образцы под нагрузкой до разрушения. Зная частоту нагружения, несложно определить время нахождения под нагрузкой (наработку). Таким образом, наклон $\text{tg}\alpha_w$ показывает динамику накопления количества циклов нагружения при изменении нагрузки, т. е. чем больше наклон кривой усталости – меньше $\text{tg}\alpha_w$, тем дольше работает материал (долговечность увеличивается) при незначительном снижении напряжения. И наоборот, чем круче наклон кривой усталости, тем больше значение $\text{tg}\alpha_w$ и меньше долговечность образца или детали.

Поскольку $\text{tg}\alpha_w$ напрямую связан с динамикой накопления повреждений в процессе циклического нагружения и с последующим разрушением образца, в данной статье этот параметр использовался в качестве прочностной характеристики исследуемого материала.

Для обработки полученных результатов применяли методы математической статистики. С целью спрямления аппроксимирующих линий экспериментальных данных для построения кривой усталости использовали логарифмические координаты в уравнении [11]

$$\lg \sigma = (\lg \sigma)_0 - \text{tg}\alpha_w \lg N, \quad (2)$$

где σ – напряжение при достижении соответствующего N ; σ_0 – напряжение при $N = 1$, отсекаемое линией кривой усталости; N – количество циклов нагружения до разрушения (долговечность).

Значение $(\lg \sigma)_0$ вычисляли по формуле

$$(\lg \sigma)_0 = \overline{\lg \sigma} - \kappa_\beta \overline{\lg N}, \quad (3)$$

где $\overline{\lg \sigma}$, $\overline{\lg N}$ – средние значения по логарифмам напряжения и количества циклов, которые определяли следующим образом:

$$\overline{\lg \sigma} = \frac{\sum \lg \sigma}{n}; \quad \overline{\lg N} = \frac{\sum \lg N}{n}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получим:

$$(\lg \sigma)_0 = \frac{\sum \lg \sigma - \kappa_\beta \sum \lg N}{n}. \quad (5)$$

Дисперсию по $\lg \sigma$ и $\lg N$ определяли по выражениям:

$$S_{\lg N} = \frac{1}{n-1} \left[\sum \lg^2 N - \frac{(\sum \lg N)^2}{n} \right]; \quad (6)$$

$$S_{\lg \sigma} = \frac{1}{n-1} \left[\sum \lg^2 \sigma - \frac{(\sum \lg \sigma)^2}{n} \right], \quad (7)$$

где $S_{\lg N}$, $S_{\lg \sigma}$ – дисперсия по количеству циклов и по напряжению; n – число экспериментальных данных.

Для определения коэффициента корреляции использовали уравнение

$$K_{\text{кор}} = \frac{\kappa_\beta S_{\lg N}}{S_{\lg \sigma}}, \quad (8)$$

где κ_β – коэффициент регрессии, который определяет наклон кривой усталости, $\kappa_\beta = \text{tg}\alpha_w$.

Коэффициент корреляции $K_{\text{кор}}$ отображает степень сходимости построенного графика кривой усталости с полученными результатами эксперимента, который применили как показатель степени стабильности поведения исследованных сплавов.

Для сравнительной оценки прочностных характеристик на требуемой базе испытаний ($N = 10^6$ циклов) был введен относительный коэффициент ограниченной выносливости χ , вычисляемый по формуле

$$\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_B}, \quad (9)$$

где $\sigma_{N=10^6}$ – напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа.

Принятый коэффициент ограниченной выносливости χ позволяет производить сравнительную оценку относительно максимальных прочностных характеристик (предел прочности σ_B) как одного материала при разных спектрах нагружения, так и сравнивать различные материалы без каких-либо сложных расчетов. Чем он ближе к единице, тем выше усталостные характеристики исследуемого материала – повреждаемость меньше и выше работоспособность этого материала при приближении к предельным нагрузкам (σ_B).

Учитывая конструкционные особенности используемых установок для испытаний на усталость и рекомендации ГОСТ 25.502–79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость», для исследований были изготовлены плоские и цилиндрические образцы небольших размеров, изображенные на рис. 2.

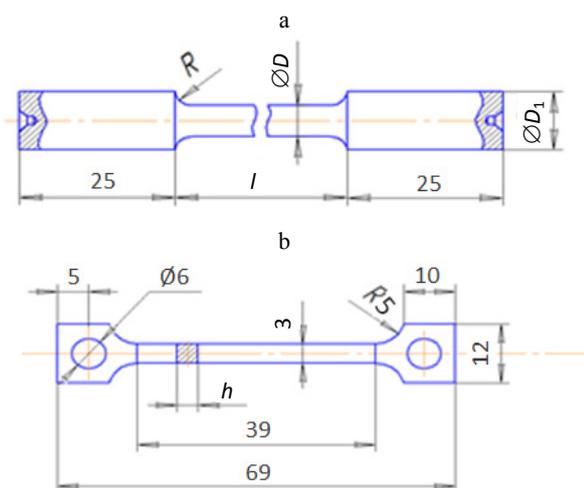


Рис. 2. Эскизы образцов: а – цилиндрический образец: $\varnothing D = 5$ мм; $\varnothing D_1 = 8$ мм; $R = 5$ мм; $l = 30$ мм; б – плоский образец: $h = 3$ мм

Fig. 2. Specimen sketches: а – cylindrical specimen: $\varnothing D = 5$ mm; $\varnothing D_1 = 8$ mm; $R = 5$ mm; $l = 30$ mm; б – flat sample: $h = 3$ mm

Результаты исследований

Сталь марки 40X, подвергнутая испытаниям при трех частотах знакопеременного нагружения (ω), показала рост усталостной прочности с увеличением ω (рис. 3). Здесь необходимо отметить, что при $\omega = 2,7$ Гц (рис. 3, кривая 2) в зоне низких величин долговечности N эта сталь показывает увеличенную циклическую прочность по сравнению с экспериментами, полученными при $\omega = 2,0$ Гц (рис. 3, кривая 1).

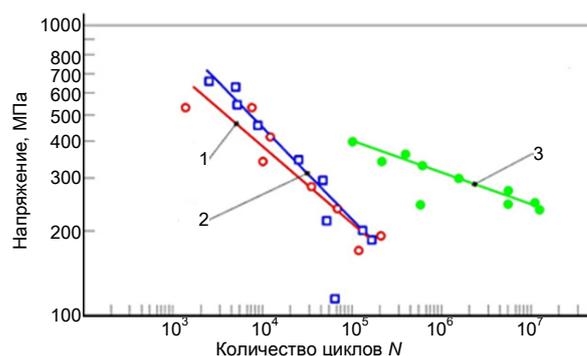


Рис. 3. Кривые усталости стали 40X для ω , Гц: 1 – 2,0; 2 – 2,7; 3 – 100,0

Fig. 3. Fatigue curves of 40X-steel for ω , Hz: 1 – 2,0; 2 – 2,7; 3 – 100,0

Однако за счет увеличения угла наклона кривая усталости опускается ниже, и на базе $N = 10^6$ циклов наблюдаются меньшие значения величин ограниченных долговечностей ($N_{\omega = 2,7 \text{ Гц}} < N_{\omega = 2,0 \text{ Гц}}$). Работоспособность стали 40X значительно возрастает при $\omega = 100,0$ Гц (рис. 3, кривая 3), что выражается в существенном наращивании количества циклов до разрушения при незначительных снижениях напряжений и проявляется в уменьшении наклона $\text{tg}\alpha_w$ до 0,1337. Такое поведение материала позволяет характеризовать заданные условия циклической работы стали 40X как наиболее оптимальные из сопоставленных на рис. 3 (для них уравнения кривых усталости: 1 – $\lg\sigma = 2,65 - 0,2655\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,901$; 2 – $\lg\sigma = 2,97 - 0,3293\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,8956$; 3 – $\lg\sigma = 2,297 - 0,1337\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9411$). Таким образом, можно предполагать, что в условиях эксплуатации реальных деталей машин и конструкций, изготовленных из стали 40X, снижение частоты циклического нагружения, сопровождаемое увеличением длительности их пребывания в нагруженном состоянии, будет уменьшать их остаточный ресурс.

Результаты экспериментов стали марки 40, проиллюстрированные на рис. 4 (для них уравнения кривых усталости: 1 – $\lg\sigma = 2,244 - 0,0877\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,779$; 2 – $\lg\sigma = 2,4275 - 0,1311\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9977$; 3 – $\lg\sigma = 2,353 - 0,16\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,98$), показывают противоположную тенденцию изменения циклической прочности в сравнении со сталью 40X – рост частоты циклов нагружения (ω) снижает усталостную прочность.

При низких частотах нагружения ω 2,0 и 2,7 Гц (рис. 4, кривые 1, 2) в малоцикловой области наблюдаем равные величины усталостной прочности при одинаковой наработке.

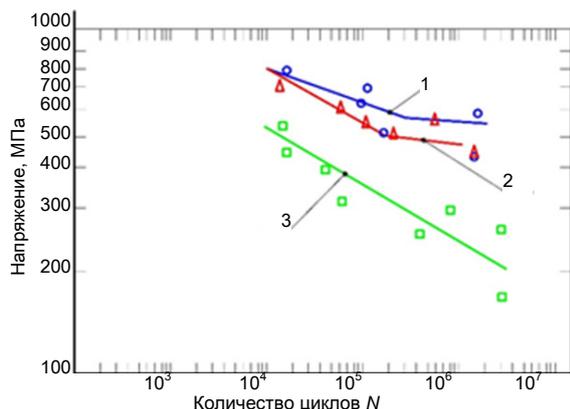


Рис. 4. Кривые усталости стали 40 для ω , Гц:
1 – 2,0; 2 – 2,7; 3 – 46,7

Fig. 4. Fatigue curves of 40-steel for ω , Hz:
1 – 2.0; 2 – 2.7; 3 – 46.7

Снижение нагрузки при испытаниях последующих образцов показывает различие в наклонах кривых усталости при разных частотах нагружения и, соответственно, имеют значения $\text{tg}\alpha_w = 0,0877$ при $\omega = 2,0$ Гц и $\text{tg}\alpha_w = 0,1311$ при $\omega = 2,7$ Гц, что приводит к разнице в 50 МПа выдерживаемой нагрузки на базе $N = 10^6$ циклов. Работоспособность стали марки 40 падает с увеличением частоты циклического нагружения до 46,7 Гц (рис. 4, кривая 3), при этом не наблюдается существенного изменения тангенса угла наклона кривой усталости $\text{tg}\alpha_w$. Приращение долговечности N при уменьшении напряжений носит похожий характер с результатами, полученными при $\omega = 2,7$ Гц; различие наблюдается в приложении меньших изгибных моментов в ходе эксперимента при частоте 46,7 Гц. Для стали 40 можно предположить, что снижение частоты нагружения реального объекта, сопровождаемое увеличением длительности его одновременного пребывания под нагрузкой, будет увеличивать его остаточный ресурс.

Экспериментальные результаты образцов из высококачественной стали 30ХГСН2А с разной прочностью, подвергнутых испытаниям по различным схемам циклического нагружения, представлены на рис. 5 (для них уравнения кривых усталости: 1 – $\lg\sigma = 4,0779 - 0,3010\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9890$; 2 – $\lg\sigma = 3,9821 - 0,3010\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9795$; 3 – $\lg\sigma = 3,9239 - 0,2552\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9900$; 4 – $\lg\sigma = 3,7682 - 0,2466\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9834$; 5 – $\lg\sigma = 3,3432 - 0,08723\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,8404$).

Испытания стали 30ХГСН2А выявили, что при частоте циклов как 0,17 Гц, так и 40,0 Гц сопротивление усталости стали с пределом проч-

ности $\sigma_b = 1800$ МПа выше, чем у образцов с пониженным пределом $\sigma_b = 1280$ МПа. Вместе с тем частота циклов нагружения в интервале от 0,17 до 40,0 Гц оказывает более сильное влияние на показатели сопротивления усталости стали 30ХГСН2А с $\sigma_b = 1800$ МПа.

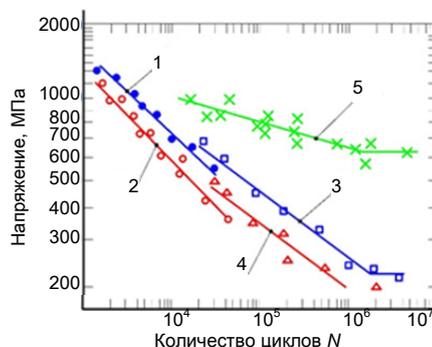


Рис. 5. Кривые усталости образцов из стали 30ХГСН2А:
 $\omega = 0,17$ Гц (1, 2) и 40,0 Гц (3, 4) и соответствующие им пределы прочности $\sigma_b = 1800$ (1, 3) и 1280 (2, 4) МПа;
5 – $\omega = 50,0$ Гц, $\sigma_b = 1500$ МПа

Fig. 5. Fatigue curves of specimens made of 30XGCH2A-steel:
 $\omega = 0.17$ Hz (1, 2) and 40.0 Hz (3, 4) and corresponding tensile strengths $\sigma_b = 1800$ (1, 3) and 1280 (2, 4) МПа;
5 – $\omega = 50.0$ Hz, $\sigma_b = 1500$ МПа

В целом существенных отличий в сопротивлении усталости данной стали, подверженной испытаниям при осевом растяжении по пульсирующему циклу, не наблюдается. Так, при частоте нагружения $\omega = 40,0$ Гц углы $\text{tg}\alpha_w$ показывают незначительное расхождение: $\text{tg}\alpha_w = 0,2552$ для стали с пределом прочности $\sigma_b = 1800$ МПа и $\text{tg}\alpha_w = 0,2466$ с $\sigma_b = 1280$ МПа, а при $\omega = 0,17$ Гц вообще наблюдается равенство, что характеризует материал определенной устойчивостью к восприятию циклических нагрузок по жесткой схеме нагружения. Существенные отличия от рассмотренных экспериментов обнаруживаются при смене вида испытаний на испытания по схеме деформации поперечного изгиба плоских образцов, термообработанных на категорию прочности $\sigma_b = 1500$ МПа. Наблюдается значительное уменьшение наклона кривых усталости с $\text{tg}\alpha_w = 0,301$ при $\omega = 0,17$ Гц для образцов с $\sigma_b = 1800$ МПа и $\sigma_b = 1280$ МПа (рис. 5) до $\text{tg}\alpha_w = 0,15051$ при $\omega = 3,33$ Гц с $\sigma_b = 1500$ МПа (рис. 6, кривая 3). Аналогичная динамика изменения показателей сопротивления усталости прослеживается и при более высоких частотах циклического нагружения (40,0 и 50,0 Гц), при этом обнаружен рост циклической прочности на базе $N = 10^6$ циклов в 1,5–2 раза. Необходимо отме-

титель, что независимо от вида испытаний сталь 30ХГСН2А показывает увеличение циклической прочности с ростом ω (рис. 5, 6, кривая 3) и в этом плане она ведет себя аналогично стали марки 40Х, поэтому предположение об условиях эксплуатации реальных деталей машин и конструкций, изложенное выше в отношении стали 40Х, применимо и для высокопрочной стали 30ХГСН2А.

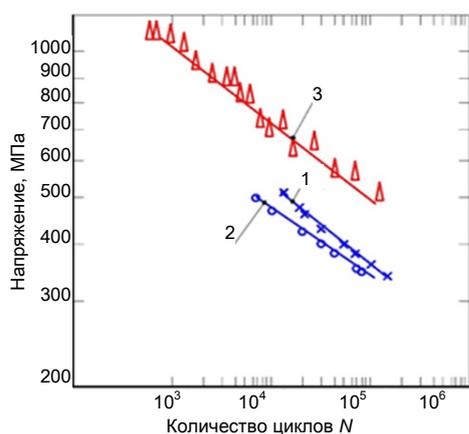


Рис. 6. Кривые усталости образцов для ω , Гц: из титанового сплава ОТ-4-1: 1 – 37,0; 2 – 1,0 и стали 30ХГСН2А: 3 – 3,33

Fig. 6. Fatigue curves of specimens for ω , Hz: from OT-4-1-titanium alloy: 1 – 37.0; 2 – 1.0 and 30ХГСН2А-steel: 3 – 3.33

С ростом частоты нагрузки при испытаниях образцов из титанового сплава ОТ-4-1 наблюдалось ухудшение сопротивления усталости, показатель $\text{tg}\alpha_\omega$ количественно возрастает (рис. 6: уравнения кривых усталости: 1 – $\lg\sigma = 3,5866 - 0,2219\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9799$; 2 – $\lg\sigma = 3,2607 - 0,1461\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9899$; 3 – $\lg\sigma = 3,4446 - 0,1505\lg N$; $K_{\text{кор}} = 0,9994$). Однако более крутой наклон кривой усталости при $\omega = 37,0$ Гц не сказывается на величинах ограниченных циклов усталости на базе $N = 10^6$ циклов – циклическая прочность одинакова. Подобное поведение сплава ОТ-4-1 сравнимо с результатами испытаний стали 40Х в области низких частот нагружения (рис. 3, кривые 1, 2) в зеркальном отображении. Фактически мы наблюдаем противоположную картину изменения показателя сопротивления усталости в сравнении с рис. 3.

Таким образом, исследования представленной группы широкоиспользуемых конструкционных материалов показали, что все испытанные конструкционные стали и сплавы также попадают в две группы, определенные нами ранее: в одном случае с ростом частоты циклов нагружения ω улучшается сопротивление уста-

лости сплавов – показатель $\text{tg}\alpha_\omega$ количественно снижается (стали 40Х, 30ХГСН2А, титановый сплав ОТ 4-1), в другом – наоборот, ухудшается (сталь 40, титановый сплав ОТ 4-1).

Закономерности прочностных характеристик и стабильности поведения сплавов

В рамках представленного подхода предполагается аттестовывать исследованные материалы по динамике эволюции показателей $\text{tg}\alpha_\omega$, $K_{\text{кор}}$ и χ . Схема названных параметров в сопоставлении с экспериментальными данными и прочностными показателями представлена на рис. 7.

Данная система параметров позволяет обстоятельно отображать функциональные связи и закономерности поведения материалов при испытаниях на усталость с учетом изменения частот нагружения (с увеличением частоты нагружения время пребывания под нагрузкой уменьшается, что показано на рис. 7). По мнению автора, система дает возможность обеспечить целостность описания совокупности процессов упрочнения-разупрочнения, не углубляясь в рассмотрение таких существенных параметров, как дисторсия кристаллической решетки, разориентировка блоков и зерен и других, которые в той или иной мере сказываются на значениях используемых показателей.

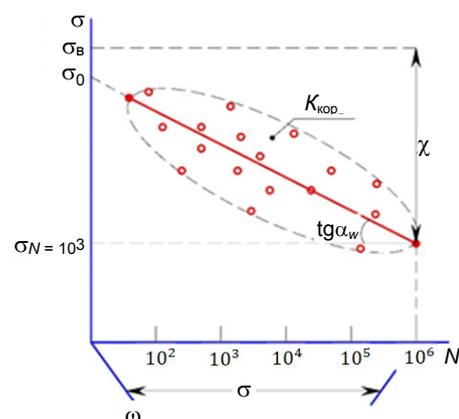


Рис. 7. Схематическое изображение системы показателей оценки поведения материалов при испытаниях на усталость

Fig. 7. Schematic representation of indicator system for assessing behavior of materials in fatigue tests

Результаты вычислений указанных параметров по полученным экспериментальным данным представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели сплавов при разных частотах нагружения
Parameters of alloys at different loading frequencies

Материал	ω , Гц	$tg\alpha_w$	$\sigma_{N=10^6}$, МПа	$K_{кор}$	χ
Сталь 40X	2,0	0,2655	115	0,901	0,125
	2,7	0,3293	105	0,8956	0,114
	100,0	0,1337	310	0,411	0,337
Сталь 40	2,0	0,0877	540	0,779	0,700
	2,7	0,1311	480	0,9977	0,610
	46,7	0,16	250	0,98	0,320
ОТ-4-1	1,0	0,1461	240	0,9899	0,230
	37,0	0,2219	240	0,9799	0,230
Сталь ($\sigma_b = 1280$ МПа) 30ХГСН2А	0,17	0,3010	235	0,9795	0,180
Сталь ($\sigma_b = 1800$ МПа) 30ХГСН2А	0,17	0,3010	275	0,9890	0,153
Сталь ($\sigma_b = 1280$ МПа) 30ХГСН2А	40,0	0,2466	200	0,9834	0,156
Сталь ($\sigma_b = 1800$ МПа) 30ХГСН2А	40,0	0,2552	265	0,9900	0,147
Сталь 30ХГСН2А	3,33	0,15051	360	0,9940	0,210
	50,0	0,08723	635	0,8404	0,420

Максимальная циклическая прочность стали 40X обнаруживается при частоте 100 Гц, что количественно выражено в увеличении значений $K_{кор}$ и χ , при этом $tg\alpha_w$ заметно уменьшается по отношению к результатам при испытаниях в диапазоне низких частот 2,0 и 2,7 Гц и характеризуется повышением долговечности и стойкости этой стали под действием циклических напряжений. Наблюдается увеличение стабильности поведения стали марки 40X в области повышения скорости деформирования, что подтверждается уменьшением разброса экспериментальных данных и числом выражено коэффициентом корреляции $K_{кор} = 0,9411$.

Испытания при низких частотах циклического нагружения показывают неоднозначное распределение прочности и долговечности. При $\omega = 2,7$ Гц материал выдерживает существенно большие напряжения, чем при $\omega = 2,0$ Гц при одинаковой наработке в 10^3 циклов, но на базе долговечности 10^6 коэффициент χ оказывается ниже и сопровождается высоким значением $tg\alpha_w$, что говорит о большем разупрочнении стали 40X при частоте нагружения 2,7 Гц. Для этих частот наблюдается средняя стабильность поведения материала, которая

идентифицируется относительным постоянством разброса экспериментальных данных и выражена практически одинаковым коэффициентом корреляции.

Представленные численные значения по стали 40 в табл. 2 при $\omega = 2$ Гц демонстрируют высокое значение χ и очень низкую величину наклона кривой усталости $tg\alpha_w$, но малый показатель стабильности поведения материала $K_{кор} = -0,779$ указывает на непредсказуемость работы материала. То есть при одном и том же значении напряжений при этой частоте разрушение может произойти достаточно быстро, а может не произойти вовсе. С возрастанием частоты нагружения $tg\alpha_w$ численно растет, коэффициент χ снижается – циклическая прочность падает, но при этом нужно отметить очень большие значения коэффициентов корреляции при частотах нагружения 2,7 и 46,7 Гц, что показывает постоянство работы стали во всем диапазоне долговечности.

Анализ полученных результатов по титановому сплаву ОТ-4-1 выявляет одинаковые значения χ при различных частотах, однако существенно меньшее значение $tg\alpha_w$ при $\omega = 1$ Гц показывает более высокую прочность за весь период циклов нагрузки, в то время как стабильность титанового сплава очень высока, что подтверждается $K_{кор}$.

У стали 30ХГСН2А максимальные значения прочности и долговечности выявлены при $\omega = 3,33$ и 50,00 Гц, что в основном связано со смягчением схемы нагружения и подтверждается значениями параметров из табл. 2. Стабильность стали при разных видах испытаний очень высока, что и отражается в широком ее применении в авиастроении для высоконагруженных деталей, правда, при $\omega = 50$ Гц замечен некоторый ее спад.

ВЫВОДЫ

1. На основании экспериментальных данных установлено, что у сталей 40X, 30ХГСН2А с повышением частоты циклического нагружения усталостная прочность и долговечность возрастают, наблюдается увеличение стабильности поведения в области повышения скорости деформирования, а у сталей 40, 30ХГСН2А и титанового сплава ОТ-4-1 снижаются, при этом выявлена высокая стабильность работы во всем диапазоне долговечности, за исключением стали 40 при $\omega = 2$ Гц.

2. Повышение усталостной прочности приводит к уменьшению наклона кривой усталости

сти $\text{tg}\alpha_w$ независимо от уменьшения или увеличения частоты нагрузки ω .

3. Предложен новый подход для аттестации материалов, который включает в себя систему параметров из относительного коэффициента ограниченной выносливости, коэффициента корреляции и тангенса наклона кривой усталости, что позволяет обстоятельно отображать функциональные связи и закономерности поведения материалов при испытаниях на усталость.

4. С учетом проведенных исследований можно предполагать, что в условиях эксплуатации реальных деталей машин и конструкций, изготовленных из стали 40X, 30ХГСН2А снижение частоты циклического нагружения, сопровождаемое увеличением длительности их пребывания в нагруженном состоянии, будет уменьшать их остаточный ресурс, а изготовленных из стали 40, и титанового сплава ОТ-4-1, – увеличивать. Таким образом, при изготовлении валов, работающих при очень низких частотах нагружения, при выборе материала для их изготовления между сталями 40 и 40X при прочих равных условиях (стоимость этих сталей существенно не различается, и прочностные характеристики близки при определенных методах обработки) рекомендуется брать сталь 40, а при частотах 50 Гц и более – сталь 40X.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбовец, М. А. Влияние температуры, коэффициента асимметрии и частоты на скорость роста трещины усталости в сплаве ВТ8 / М. А. Горбовец, Н. А. Ночовная // Вопросы материаловедения. 2015. Т. 82, № 2. С. 216–220.
2. Терентьев, В. Ф. Усталость металлов / В. Ф. Терентьев, С. А. Кorableva. М.: Наука, 2015. 479 с.
3. Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний: справ. / Л. М. Школьник. М.: Metallurgiya, 1978. 304 с.
4. Трошенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В. Т. Трошенко, Л. А. Сосновский. Киев: Наукова думка, 1987. 1303 с.
5. Structural Analysis of Cyclic-loaded Nickel-Titanium Rotary Instruments by Using Resonance Frequency as a Parameter / Haw-Ming Huang [et al.] // JOE. 2011. Vol. 37, No 7. P. 993–996.
6. Yasniy, P. V. Effect of Temperature, Frequency and Loading Waveform on Fatigue Crack Growth in Bimaterial of the Roll for Continuous Casting Machines / P. V. Yasniy, P. O. Maruschak, V. B. Hlado // Proc. Int. Conf. "Progressive Technologies and Materials in Engineering", 28–30 June 2005, Rzeszow-Bezmiechowa, Poland. Rzeszow: RUT, 2005. P. 117–124.
7. Ирвин, Дж., Парис, П. Основы теории роста трещин и разрушения // Разрушение. Т. 3 / под общ. ред. Г. Либовица. М.: Мир, 1976. С. 17–66.
8. Honeycombe, R. W. K. The Plastic Deformation of Metals / R. W. K. Honeycombe. London: Edward Arnold Ltd., 1984. 483 p.

9. Мыльников, В. В. О влиянии частоты приложения нагрузки на сопротивление усталости материалов / В. В. Мыльников // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. Т. 2, № 6. С. 202–205.
10. Mylnikov, V. V. On Evaluation of Durability Criteria in Carbon Steels / V. V. Mylnikov, D. I. Shetulov, E. A. Chernyshev // Metals Technology. 2010. No 2. P. 19–22.
11. Шетулов, Д. И. К оценке сопротивления усталости материалов по повреждению поверхностных аномальных слоев / Д. И. Шетулов // Физико-химическая механика материалов. 1984. № 6. С. 117.

Поступила 04.05.2018

Подписана в печать 10.07.2018

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

1. Gorbovets M. A. Nochovnaya N. A. (2015) Influence of Temperature, Asymmetry Ratio and Frequency on Fatigue Crack Propagation Rate in Alloy BT8. *Voprosy Materialovedeniya*, 82 (2), 216–220 (in Russian).
2. Terentiev V. F., Korableva S. A. (2015) *Fatigue of Metals*. Moscow, Nauka Publ. 479 (in Russian).
3. Shkolnik L. M. (1978) *Methodology of Fatigue Tests*. Moscow, Metallurgiya Publ. 304 (in Russian).
4. Troshchenko V. T., Sosnovskii L. A. (1987) Resistance to Fatigue of Metals and Alloys. Kiev, Navukova Dumka Publ. 1303 (in Russian).p.
5. Haw-Ming Huang, Wei-Jen Chang, Nai-Chia Teng, Hung-Lung Lin, Sung-Chih Hsieh (2011) Structural Analysis of Cyclic-Loaded Nickel-Titanium Rotary Instruments by Using Resonance Frequency as a Parameter. *Journal of Endodontics*, 37 (7), 993–996. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.03.022>.
6. Yasniy P. V., Maruschak P. O., Hlado V. B. (2005) Effect of Temperature, Frequency and Loading Waveform on Fatigue Crack Growth in Bimaterial of the Roll for Continuous Casting Machines. *Proc. Int. Conf. "Progressive Technologies and Materials in Engineering"*, 28–30 June 2005, Rzeszow-Bezmiechowa, Poland. Rzeszow, RUT, 117–124.
7. Irwin G., Paris P. *Fundamentals of Aspects of Crack Growth and Fracture* // Fracture. Vol. 3 / Under General Editorship of H. Leibovitz. M. [Moscow]: Publishing House "Mir" [World], 1976, 17–66.
8. Honeycombe R. W. K. *The Plastic Deformation of Metals*. London, Edward Arnold Ltd., 1984. 483.
9. Mylnikov V. V. (2016) About Influence of Load Rate on Resistance to Material Fatigue. *Mezhdunarodny Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Investigations], 2 (6), 202–205 (in Russian).
10. Mylnikov V. V., Shetulov D. I., Chernyshev E. A. (2010) On Evaluation of Durability Criteria in Carbon Steels. *Metals Technology*, (2), 19–22.
11. Shetulov D. I. (1984) For Assessment of Material Fatigue According to Damage of Surface Anomalous Layers. *Phiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov* [Physico-Chemical Mechanics of Materials], (6), 117 (in Russian).

Received: 04.05.2018

Accepted: 10.07.2018

Published online: 30.09.2019