

ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАХ НАГРУЖЕНИЯ

Мыльников В.В.¹, к.т.н., доцент кафедры «Технологии строительства» (mrmynikov@mail.ru)

Шетулов Д.И.², д.т.н., профессор кафедры «Материаловедение, технология материалов
и термическая обработка металлов» (shetulov@mail.ru)

Кондрашкин О.Б.¹, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технологии
строительства» (tsp-nngasu@mail.ru)

Чернышов Е.А.², д.т.н., профессор кафедры «Металлургические технологии
и оборудование» (taep@nntu.ru)

Пронин А.И.³, к.т.н., доцент кафедры «Технология машиностроения» (mdsov@knastu.ru)

¹ Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
(603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65)

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24)

³ Комсомольский-на-Амуре государственный университет
(681013, Россия, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

Аннотация. Исследовали на усталостную прочность широко используемые машиностроительные конструкционные стали при различных частотах нагружения по схеме консольного изгиба вращающихся цилиндрических образцов. За показатель сопротивления усталости принят тангенс угла наклона кривой усталости к оси долговечности. Установлено, что стали 40 и 45 относятся к группе материалов, у которых уменьшение частоты нагружения приводит к циклическому разупрочнению и понижению сопротивления усталости, что численно выражается возрастанием наклона кривой усталости. Испытания образцов из стали 40Х показали, что увеличение частоты циклов нагружения приводит к заметному уменьшению параметра наклона кривой усталости, т.е. к повышению сопротивления усталости. Понижение величины параметра сопротивления усталости связано с повышением упрочняемости материала поверхностных слоев образцов (деталей), что снижает усталостную повреждаемость собственно поверхности. Приведена зависимость тангенса наклона кривой усталости от повреждаемости поверхности при изменении частоты циклов нагружения и показано, что независимо от частоты при увеличении наклона кривой усталости повреждаемость поверхностных слоев материала увеличивается. Для каждой из этих групп определены математические соотношения. За критерий стабильности циклического поведения сталей был принят коэффициент корреляции, показывающий степень сходимости полученных экспериментальных результатов с построенной кривой усталости. Выявлено, что увеличение стабильности поведения стали 40Х наблюдается при повышении скорости циклического деформирования. Испытания стали марки 45 показали, что уменьшение циклической прочности при увеличении частоты нагружения не сказывается на усталостной стабильности работы материала. Увеличенный разброс экспериментальных результатов наблюдали у стали 40 при низкой частоте нагружения, несмотря на высокие значения циклической прочности при заданной частоте нагружения. На основании проведенных экспериментов обозначена динамика поведения реальных деталей машин и конструкций, подверженных циклическим нагрузкам, работающих в исследованном спектре нагружения.

Ключевые слова: частота циклов нагружения, сопротивление усталости, прочность, долговечность, машиностроительная сталь, упрочнение, повреждаемость поверхности.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-796-802

ВВЕДЕНИЕ

Проблема разрушения деталей машин при многократной повторяющейся нагрузке, для которой наряду с величиной нагрузки решающее значение имеют ее частота и число циклов нагружения, известна с начала развития промышленного машиностроения в XIX в. [1, 2]. Большинство деталей из конструкционных металлических материалов, используемых в машиностроении, агрегатостроении и авиастроении, работают в условиях циклических знакопеременных нагрузок или напряже-

ний [3 – 8]. Опасность разрушения таких деталей при воздействии различных факторов особенно остро возникла в настоящее время, так как увеличились нагрузки и частотно-скоростные диапазоны работы современной техники [9]. Работы, опубликованные в периодической печати, касаются более всего исследований, проводимых при высоких частотах нагружения, и чаще всего тех частот, при которых происходит вибрация деталей самолетов и других машин [10 – 19]. Однако, очень часто, особенно в химическом и металлургическом машиностроении детали и конструкции типа колонной аппа-

ратуры, станин прокатных станов, предохранительных мембран подвергаются нагрузкам с очень низкой частотой [4, 20 – 24]. Другая группа оборудования типа теплообменной аппаратуры компрессоров и других работает в области малоизученных частот от 1,7 до 5 Гц.

Обычно при расчетах запасов прочности по усталости (действительных запасов прочности) предел выносливости материала выбирают из справочных данных, определенный, как правило, при вращении изогнутого образца на стандартной базе испытаний 10^6 циклов при частоте приложения нагрузки не менее 50 Гц и выше (до 166,7 Гц). Естественно, надо вводить поправочный коэффициент на влияние частоты циклов при расчетах запасов прочности. Этим лишним раз доказывается необходимость проведения исследований усталостной прочности материалов в области низких частот, т.е. в пределах от долей герца до 5 Гц. В свою очередь это требует проведения испытаний тех же материалов при стандартных частотах и на стандартной базе испытаний по числу циклов.

Целью работы явилось исследование влияния фактора частоты циклов нагружения на динамику изменений показателей сопротивления усталости машиностроительных сталей.

ФАКТОР ЧАСТОТЫ НАГРУЖЕНИЯ

Частота циклов нагружения (ω) оказывает неоднозначное влияние на показатели сопротивления усталости [25 – 29]: ее возрастание может привести к увеличению наклона кривой усталости у одних металлических материалов, а у других, наоборот, к снижению, что существенным образом сказывается на долговечности и времени нахождения под нагрузкой экспериментальных образцов и деталей машин. Изменение частоты циклических нагружений приводит к изменению скорости деформации, при этом в первую очередь деформируется поверхностный слой нагруженного образца или детали. Деформация поверхностного слоя определяется поверхностными эффектами, которые являются следствием физических процессов, происходящих в приповерхностном слое. Свойства этого слоя существенным образом отличаются от свойств внутренних

слоев металла и связаны с изменениями микро- и субмикроструктуры в процессе циклического нагружения.

Исследователи работ [6, 7, 19, 27, 28] связывают механизм усталости сталей и сплавов с развитием поперечного скольжения расщепленных дислокаций, энергия активации (U) которого выражается обратной величиной энергии дефекта упаковки (γ), т.е. $U \approx 1/\gamma$. Поперечное скольжение проявляется в структуре металла в виде широких полос скольжения, интенсивность образования которых является мерой поверхностной активности металла. Из этого следует, что частота циклического нагружения при определенных условиях будет оказывать влияние на динамику изменений характеристик усталости конструкционных материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованиям на циклическую прочность были подвергнуты широко используемые машиностроительные конструкционные стали марок 40, 40Х и 45, химический состав которых представлен в табл. 1.

Испытания проводили при комнатной температуре 20 °С. За показатели сопротивления усталости приняты: наклон левой ветви кривой усталости ($\text{tg} \alpha_w$) в координатах $\lg \sigma - \lg N$ и повреждаемость поверхности (Φ) [18, 21]. Наклон левой ветви кривой усталости восприимчиво реагирует на интенсивность протекания процесса усталости, проходящего в конструкционном материале. В то же время параметр $\text{tg} \alpha_w$ коррелирует с образованием полос скольжения, возникающих на поверхности материала при циклических нагрузках.

За показатель стабильности сопротивления циклическим нагрузкам был принят коэффициент корреляции $K_{\text{кор}}$, который определял степень сходимости полученных результатов.

Цилиндрические образцы испытывались на усталость на установке, в которой осуществлена схема изгиба вращающегося образца. Конструкция установки представлена на рис. 1. Образец 1 зажимается в кантовый захват 2 промежуточной опоры, которая соединена с электродвигателем 3 через резиновую муфту 4. Свободный конец образца вставляется в подшипник 5, ко-

Т а б л и ц а 1

Химический состав сталей в соответствии с ГОСТ 4543 – 2016 и ГОСТ 1050 – 88

Table 1. Chemical composition of steels in accordance with GOST 4543 - 2016 and GOST 1050 – 88

Марка стали	Содержание, %								
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
40	0,37 – 0,45	0,17 – 0,37	0,50 – 0,80	до 0,25	до 0,040	до 0,035	до 0,25	до 0,25	до 0,08
40Х	0,36 – 0,44	0,17 – 0,37	0,50 – 0,80	до 0,30	до 0,035	до 0,035	0,80 – 1,10	до 0,30	до 0,08
45	0,42 – 0,50	0,17 – 0,37	0,50 – 0,80	до 0,25	до 0,040	до 0,035	до 0,25	до 0,25	до 0,08

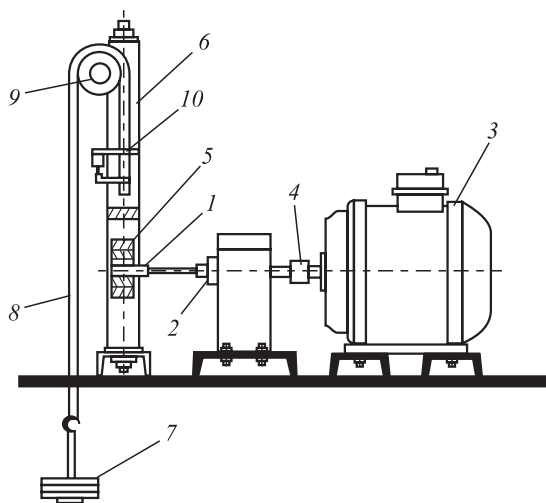


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для испытания металлов на усталость по схеме изгиб вращающегося образца

Fig. 1. Diagram of experimental unit for metals fatigue testing according to the scheme of bending of rotating sample

торый расположен в опоре нагружающего устройства 6. Нагрузка образца осуществляется с помощью грузов 7. При помощи тросика 8, перекинутого через блок 9, усилие передается на опору. На валу электродвигателя укреплен кулачок, связанный с электромагнитным счетчиком числа оборотов двигателя. Имеющиеся в установке стоп-механизм 10 и счетчик количества оборотов электродвигателя позволяют фиксировать текущее количество циклов до разрушения образца.

Перед началом испытаний в месте предполагаемого излома измеряются размеры поперечного сечения, которые заносятся в протокол. При испытании первого образца назначается напряжение, равное 0,7 от статического предела прочности при растяжении испытуемого материала. Гири плавно кладутся на поддон после определения абсолютной нагрузки и начала вращения образца. После разрушения образца или достижения им сравнительной базы испытаний 10^6 циклов электродвигатель автоматически отключается и фиксируется количество циклов. Данные заносятся в протокол испытаний.

Каждый последующий образец испытывается при напряжении, меньшем чем предыдущие на 100 – 200 МПа и т.д. У места предполагаемого излома кривой усталости изменение напряжения уменьшается до 50 – 30 МПа для более точного его определения на кривой усталости, построенной в логарифмических координатах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Испытания образцов из стали марок 40 и 45 при трех значениях частот циклического нагружения для каждой показывают снижение циклической прочности с ростом частоты нагружения (рис. 2).

Сталь 40 при $\omega = 2,0$ и $\omega = 2,7$ Гц в области малых долговечностей N имеет одинаковую циклическую прочность, но при увеличении количества циклов наклоны кривых усталости значительно расходятся. Пологий наклон при частоте нагружения $\omega = 2$ Гц характеризует увеличение усталостной прочности стали 40, но низкий показатель стабильности поведения материала $K_{кор} = 0,779$ указывает на непредсказуемость работы материала, т.е. при одном и том же значении напряжений при этой частоте разрушение может произойти достаточно быстро, а может не произойти вовсе.

Наклоны кривых усталости при частотах 2,7 и 46,7 Гц существенного различия не показывают, но циклическая прочность при $\omega = 2,7$ Гц значительно выше, и нужно отметить очень высокие значения коэффициентов корреляции при этих частотах нагружения, что показывает постоянство работы стали во всем диапазоне долговечности.

Экспериментальные точки, полученные в результате испытания стали 45, укладываются на одну общую довольно широкую полосу разброса, ограниченную сверху кривой усталости, построенной при $\omega = 46,7$ Гц, а снизу – кривой усталости при $\omega = 233,3$ Гц. Наклон

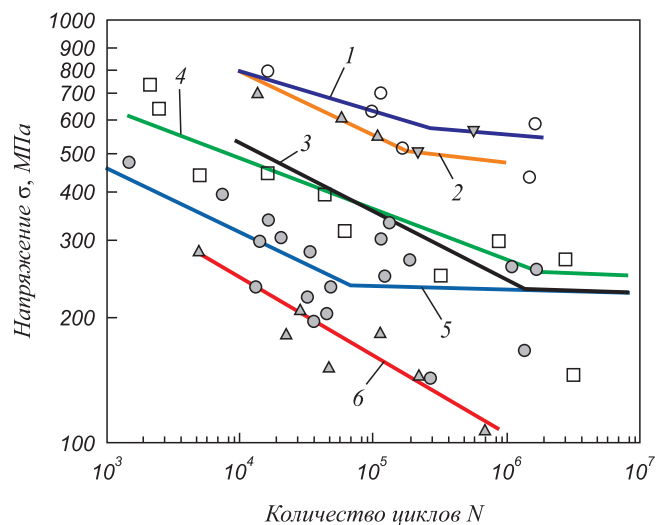


Рис. 2. Кривые усталости сталей 40 (1, 2, 3) и 45 (4, 5, 6) в логарифмических координатах при частоте циклов 2 (1), 2,7 (2), 46,7 (3, 4), 100 (5), 233,3 (6), Гц:

$$\begin{aligned}
 1 - \lg \sigma &= 2,244 - 0,08771 \lg N, K_{кор} = -0,779; \\
 2 - \lg \sigma &= 2,4275 - 0,1311 \lg N, K_{кор} = -0,9977; \\
 3 - \lg \sigma &= 2,353 - 0,161 \lg N, K_{кор} = -0,980; \\
 4 - \lg \sigma &= 2,272 - 0,1444 \lg N, K_{кор} = -0,899; \\
 5 - \lg \sigma &= 2,0885 - 0,1473 \lg N, K_{кор} = -0,889; \\
 6 - \lg \sigma &= 2,137 - 0,1853 \lg N, K_{кор} = -0,901
 \end{aligned}$$

Fig. 2. Fatigue curves of 40 (1, 2, 3) and 45 (4, 5, 6) steels in logarithmic coordinates at cycles frequency of 2 (1), 2.7 (2), 46.7 (3, 4),

$$\begin{aligned}
 100 (5), 233.3 (6), \text{ Hz:} \\
 1 - \lg \sigma &= 2.244 - 0.08771 \lg N, K_{кор} = -0.779; \\
 2 - \lg \sigma &= 2.4275 - 0.1311 \lg N, K_{кор} = -0.9977; \\
 3 - \lg \sigma &= 2.353 - 0.161 \lg N, K_{кор} = -0.980; \\
 4 - \lg \sigma &= 2.272 - 0.1444 \lg N, K_{кор} = -0.899; \\
 5 - \lg \sigma &= 2.0885 - 0.1473 \lg N, K_{кор} = -0.889; \\
 6 - \lg \sigma &= 2.137 - 0.1853 \lg N, K_{кор} = -0.901
 \end{aligned}$$

$\text{tg}\alpha_w$ сохраняется практически постоянным к оси количества циклов в область уменьшения скорости деформирования. Уменьшение циклической прочности не сказывается на усталостной стабильности работы материала. Во всем диапазоне спектра нагружения проведенных испытаний сталь 45 показывает неизменную стабильность усталостного поведения, что отражено в средних значениях коэффициентов корреляции $K_{\text{кор}} \approx 0,9$ и их несущественных отклонениях.

Испытания образцов из стали 40X при низких частотах нагружения показывают совершенно противоположные результаты в сравнении с полученными значениями при испытаниях сталей марок 40 и 45.

У стали 40X, в отличие от сталей 40 и 45, с ростом частоты циклического нагружения наблюдается увеличение циклической прочности (рис. 3). Необходимо отметить, что при $\omega = 2$ Гц в области малых долговечностей сталь 40X имеет более высокую циклическую прочность, чем при $\omega = 2,7$ Гц, однако за счет более крутого наклона кривая опускается ниже, и на базе $N = 10^6$ циклов видна заметная разница в величинах ограниченных циклов усталости.

Кривая усталости при $\omega = 100$ Гц имеет достаточно пологий наклон, характеризующий увеличение долговечности и стойкости стали под действием циклических напряжений. При этом наблюдается увеличение стабильности поведения стали 40X в область повышения скорости деформирования, что подтверждается уменьшением разброса экспериментальных данных и численно выражено коэффициентом корреляции $K_{\text{кор}} = 0,9411$.

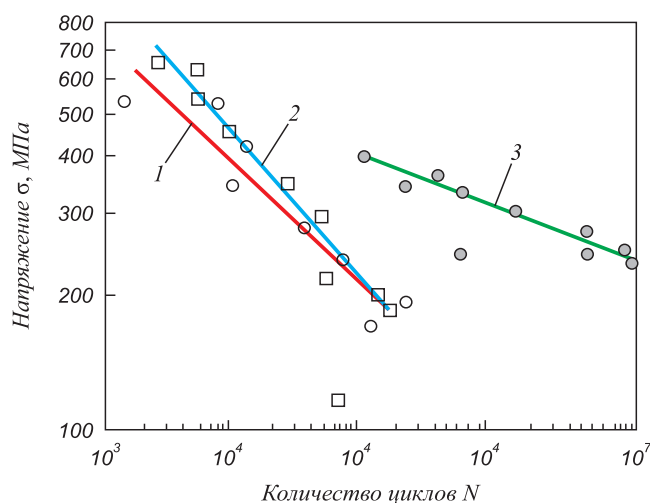


Рис. 3. Кривые усталости стали 40X в логарифмических координатах при частоте циклов 2 (1), 2,7 (2), 100 Гц (3):

$$\begin{aligned} 1 - \lg \sigma &= 2,65 - 0,655 \lg N, K_{\text{кор}} = -0,901; \\ 2 - \lg \sigma &= 2,97 - 0,3293 \lg N, K_{\text{кор}} = -0,8956; \\ 3 - \lg \sigma &= 2,297 - 0,1337 \lg N, K_{\text{кор}} = -0,9411 \end{aligned}$$

Fig. 3. Fatigue curves of 40Xh steel in logarithmic coordinates at cycles frequency of 2 (1), 2.7 (2), 100 (3) Hz:

$$\begin{aligned} 1 - \lg \sigma &= 2.65 - 0.655 \lg N, K_{\text{кор}} = -0.901; \\ 2 - \lg \sigma &= 2.97 - 0.3293 \lg N, K_{\text{кор}} = -0.8956; \\ 3 - \lg \sigma &= 2.297 - 0.1337 \lg N, K_{\text{кор}} = -0.9411 \end{aligned}$$

Анализ экспериментальных данных позволил получить численные значения различных параметров физико-механических свойств, связанных с изменением частоты циклов нагружения. Эти данные представлены в табл. 2. Величины напряжений $\sigma_N = 10^6$ в некоторых случаях условные, т.е. они получены путем продолжения левой ветви кривой усталости до пересечения с ординатой долговечности $N = 10^6$ циклов (см., например, рис. 3, кривые 1, 2). Есть такие случаи, когда излом кривой усталости соответствует долговечности $N < 10^6$ циклов, например, кривые 1, 2, 5 на рис. 2, но в этом случае показываем два числа (пункты 4, 5, 8 в табл. 2).

В ряде случаев частота циклов нагружения оказывает существенное влияние на показатели сопротивления усталости. Ранее [27 – 30] были выделены две группы материалов по признакам влияния частоты циклического нагружения на показатели сопротивления усталости. Первая группа материалов показала, что рост частоты нагружения приводит к циклическому разупрочнению и уменьшению сопротивления усталости, что численно выражается возрастанием параметра $\text{tg}\alpha_w$. У второй группы материалов увеличение частоты циклов нагружения и в дополнение к этому смягчение схемы напряженного состояния (деформация вращения изогнутого образца) приводят к заметному уменьшению параметра $\text{tg}\alpha_w$, т.е. к возрастанию сопротивления усталости.

Компьютерная обработка полученных результатов позволила получить следующие математические зависимости:

– $\text{tg}\alpha_w = 0,0356 \ln \omega + 0,065$ по первой группе материалов;

– $\text{tg}\alpha_w = 0,262 \omega^{-0,1301}$ по второй группе материалов.

Таким образом, машиностроительные стали марок 40 и 45 относятся к первой группе, а 40X – ко второй. Улучшение параметра сопротивления усталости связано с повышением упрочнения поверхностных слоев образцов (деталей) из исследованных сталей, что снижает усталостную повреждаемость собственно поверхности. Однако надо иметь в виду, что параметр $\text{tg}\alpha_w$ напрямую связан с повреждаемостью поверхности (Φ), и в обеих группах металлов рост показателя Φ приводит к увеличению $\text{tg}\alpha_w$ [30, 31].

Выводы

Сталь марки 40X с увеличением частоты циклического нагружения показывает повышение циклической прочности, а стали 40 и 45, наоборот, снижение. Таким образом, при выборе материала для деталей машин, работающих в одинаковых (похожих) условиях эксплуатации при низких частотах нагружения целесообразнее использовать углеродистые стали 40, 45 вместо низколегированных хромистых сталей типа 40X.

Параметры сопротивления усталости сталей при изменении частоты циклического нагружения с учетом их статической прочности

Table 2. Parameters of steel fatigue resistance when changing frequency of cyclic loading, taking into account their static strength

№ п/п	Марка стали	Частота циклов, ω , Гц	Показатель сопротивления усталости, $tg\alpha_w$	Напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	$\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_b}$
1	40X	2,0	0,2655	115*	920	0,128
2	40X	2,7	0,3293	105	920	0,117
3	40X	100	0,1337	310	920	0,337
4	40	2,0	0,0877	540**	780	0,640
				500		0,700
5	40	2,7	0,1311	480	780	0,530
				380		0,610
6	40	46,7	0,1600	250	780	0,320
7	45	46,7	0,1444	270	900	0,300
8	45	100,0	0,1473	230	900	0,190
				170		0,250
9	45	233,3	0,1853	110	900	0,122

* Значение напряжения, отсекаемого левой ветвью кривой усталости или продолжением ее до пересечения с ординатой, соответствующей $N = 10^6$ циклов;

** Число в знаменателе получено путем условного пересечения левой ветви кривой усталости с ординатой долговечности $N = 10^6$ циклов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. – М.: Наука, 2015. – 479 с.
2. Suresh S. Fatigue of metals. Cambridge University Press, 2006. – 701 p.
3. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Konovalov. – Cambridge, 2015. – 272 p.
4. Honeycombe R.W.K. The Plastic Deformation of Metals. – London: Edward Arnold Ltd., 1984. – 483 p.
5. Vitaliy Kazymyrovych. Very high cycle fatigue of engineering materials – A literature review. – Karlstad University Studies, 2009. – 22 p.
6. Панин В.Е. Физическая мезомеханика материалов. Т. 1. Под ред. С.Г. Псахье. – Томск: изд. ТГУ, 2015. – 462 с.
7. Владимирова В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
8. Шаняевский А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций. Синергетика в инженерных приложениях. – Уфа: Монография, 2003. – 803 с.
9. Мак-Ивили А.Дж. Анализ аварийных разрушений / Пер. с англ. Э.М. Лазарева, И.Ю. Шкадиной. Под. ред. Л.Р. Ботвиной. – М.: Техносфера, 2010. – 416 с.
10. Schijve J. Fatigue of Structures and Materials in the 20th Century and the State of the Art // International Journal of Fatigue. 2003. Vol. 25. P. 679-702.
11. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
12. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. – Киев: Наукова думка, 1987. – 1303 с.
13. Иванова В.С., Шаняевский А.А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. – М.: Металлургия, 1988. – 399 с.
14. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в разных условиях нагружения. Учебн. пособие / Г.В. Пачурин, А.Н. Гушин, К.Г. Пачурин, Г.В. Пименов. – Нижний Новгород: изд. Нижегородского гос. университета, 2005. – 141 с.
15. Haw-Ming Huang, Wei-Jen Chang, Nai-Chia Teng, Hung-Lung Lin, and Sung-Chih Hsieh. Structural Analysis of Cyclic-loaded Nickel-Titanium Rotary Instruments by Using Resonance Frequency as a Parameter // JOE. 2011. Vol. 37. No. 7. P. 993 – 996.
16. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов / Пер. с польск. Г.Н. Мехеда. Под ред. С.Я. Яремы. – М.: Металлургия, 1990. – 432 с.
17. Weiss T. ASTM Bulletin. 1949. February. P. 188; P. 31.
18. Proceedings of the International Conference VHCF-5, June 28 – 30, 2011, Berlin. Edited by C. Berger, H.-J. Christ. Berlin, Germany: DVM, 2011. – 980 p.
19. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1974. – 255 с.
20. Yakovleva T.Yu., Matokhnyuk L.E. Prediction of Fatigue Characteristics of Metals at Different Loading Frequencies // Strength of Materials. 2004. Vol. 36. No. 4. P. 442-448.
21. Ясний П.В., Марушак П.О., Панин С.В., Любутин П.С., Баран Д.Я., Овечкин Б.Б. Стадийность деформирования материала и кинетика роста усталостной трещины в стали 25X1M1Ф при низких частотах нагружения // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 2. С. 97 – 107.
22. Konovalov S., Aksenova K., Gromov V., Ivanov Yu., Semina O. The influence of electron beam treatment on alloy structure destroyed at high-cycle fatigue // Key Engineering Materials. 2016. January. Vol. 675-676. P. 655 – 659.

23. Mughrabi H., Christ H. - J. Cyclic deformation and fatigue of selected ferritic and austenitic steels; specific aspects // *ISIJ International*. 1997. Vol. 37. No. 12. P. 1154 – 1169.
24. Musuva J. K. Radon J. C. The effect of stress ratio and frequency on fatigue crack growth // *Fatigue of Eng. Materials and Structures*. 1979. Vol. 1. P. 457-470.
25. Marines I., Bin X. and Bathias C. An understanding of very high cycle fatigue of metals // *International Journal of Fatigue*. 2003. Vol. 25. No. 9-11. P. 1101 – 1107.
26. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Variation in factors of fatigue resistance for some pure metals as a function of the frequency of loading cycles // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2010. Vol. 51. No. 3. P. 237 – 242.
27. Шетулов Д.И. Связь сопротивления циклической нагрузке с повреждаемостью поверхности металлов // *Изв. Академии наук. Металлы*. 1991. № 5. С. 160.
28. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Investigation into the Surface Damage of Pure Metals Allowing for the Cyclic Loading Frequency // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2013. Vol. 54. No. 3. P. 229 – 233.
29. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. On Evaluation of Durability Criteria in Carbon Steels // *Metals Technology*. 2010. No. 2. С. 19 – 22.
30. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Влияние частоты циклического нагружения на сопротивление усталости высокопрочных конструкционных материалов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2009. № 2. С. 33 – 36.
31. Мыльников В.В. О влиянии частоты приложения нагрузки на сопротивление усталости материалов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 6-2. С. 202 – 205.

Поступила в редакцию 5 февраля 2018 г.

После доработки 8 июля 2019 г.

Принята к публикации 29 июля 2019 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. No. 10, pp. 796–802.

CHANGES IN FATIGUE RESISTANCE OF STRUCTURAL STEELS AT DIFFERENT LOADING SPECTRA

V.V. Myl'nikov¹, D.I. Shetulov², O.B. Kondrashkin¹,
E.A. Chernyshov², A.I. Pronin³

¹ Nizhny Novgorod State University of Architecture, Building and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Russia, Nizhny Novgorod, Russia

³ Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory, Russia

Abstract. Fatigue strength of widely used engineering structural steels was studied at various frequencies of loading according to the scheme of cantilever bending of the rotating cylindrical samples. Fatigue resistance index is tangent of angle of inclination of fatigue curve to axis of longevity. It is established that 40 and 45 steels belong to the group of materials in which decrease in frequency of loading leads to cyclic softening and decrease in fatigue resistance, which is numerically expressed by increasing slope of fatigue curve. Tests of the samples made of 40X steel had shown that increase in frequency of loading cycles leads to a noticeable decrease in slope of fatigue curve parameter, i.e. to an increase in fatigue resistance. Decrease in fatigue resistance parameter is associated with an increase in hardening of material of the samples (parts) surface layers which reduces fatigue damage to the surface itself. Dependence of the fatigue curve slope tangent on surface damage at changing loading cycles frequency is shown and it is stated that, regardless of frequency, damage of material surface layers increases along the slope of fatigue curve. For each of these groups mathematical relations are defined. The correlation coefficient providing degree of convergence of experimental results with the constructed fatigue curve was adopted as a criterion of cyclic behavior stability of steels. It is revealed that increase in behavior stability of 40X steel is observed with increase in cyclic deformation rate. Tests of 45 steel have shown that decrease in cyclic strength with increase in loading frequency does not affect fatigue stability of material. Increased dispersion of experimental results was observed in 40 steel at low loading frequency, despite the high values of cyclic strength at given loading frequency. On the basis of conducted experiments, dynamics of behavior of real machine parts and structures subjected to cyclic loads operating was determined in the studied loading spectrum.

Keywords: frequency of loading cycles, fatigue resistance, strength, durability, engineering steel, hardening, surface damage.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-10-796-802

REFERENCES

1. Terent'ev V.F., Korableva S.A. *Ustalost' metallov* [Metal fatigue]. Moscow: Nauka, 2015, 479 p. (In Russ.).
2. Suresh S. *Fatigue of metals*. Cambridge University Press, 2006, 701 p.
3. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.V., Konovalov S.V. *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams*. Cambridge, 2015, 272 p.
4. Honeycombe R.W.K. *The Plastic Deformation of Metals*. London: Edward Arnold Ltd., 1984, 483 p.
5. Kazymirovych V. *Very high cycle fatigue of engineering materials – A literature review*. Karlstad University Studies, 2009, 22 p.
6. Panin V.E. *Fizicheskaya mezomekhanika materialov. Tom 1* [Physical mesomechanics of materials. Vol. 1]. Psakh'e S.G. ed. Tomsk: TGU, 2015, 462 p. (In Russ.).
7. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* [Physical nature of metals destruction]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 280 p. (In Russ.).
8. Shanyavskii A.A. *Bezopasnoe ustalostnoe razrushenie elementov aviakonstruktsii. Sinergetika v inzhenernykh prilozheniyakh* [Safe fatigue failure of aircraft components. Synergy in engineering applications]. Ufa: Monografiya, 2003, 803 p. (In Russ.).
9. McEvily A.J. *Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention*. New York: Wiley, 2002, 324 p. (Russ.ed.: McEvily A.J. *Analiz aviariynykh razrushenii*. Moscow: Tekhnosfera, 2010, 416 p.).
10. Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*. 2003, vol. 25, pp. 679–702.
11. Shkol'nik L.M. *Metodika ustalostnykh ispytaniy. Spravochnik* [Fatigue testing technique. Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 304 p. (In Russ.).
12. Troshchenko V.T., Sosnovskii L.A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov* [Fatigue resistance of metals and alloys]. Kiev: Naukova dumka, 1987, 1303 p. (In Russ.).
13. Ivanova V.S., Shanyavskii A.A. *Kolichestvennaya fraktografiya. Ustalostnoe razrushenie* [Quantitative fractography. Fatigue fracture]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 399 p. (In Russ.).
14. Pachurin G.V., Gushchin A.N., Pachurin K.G., Pimenov G.V. *Tekhnologiya kompleksnogo issledovaniya razrusheniya deformirovannykh metallov i splavov v raznykh usloviyakh nagruzheniya. Ucheb. posobie* [Technology of comprehensive study of destruction of deformed metals and alloys under different loading conditions. Manual]. Nizhny Novgorod: izd NGU, 2005, 141 p. (In Russ.).

15. Haw-Ming Huang, Wei-Jen Chang, Nai-Chia Teng, Hung-Lung Lin, and Sung-Chih Hsieh. Structural analysis of cyclic-loaded nickel-titanium rotary instruments by using resonance frequency as a parameter. *JOE*. 2011, vol. 37, no. 7, pp. 993–996.
16. Kotsan'da S. *Ustalostnoe rastreskivanie metallov* [Fatigue cracking of metals]. Trans. from Polish. Yarema S.Ya. ed. Moscow: Metallurgiya, 1990, 432 p. (In Russ.).
17. Weiss T., *ASTM Bulletin*, 1949, February, p. 188; p. 31.
18. *Proceedings of the Int. Conf. VHCF-5, June 28-30, 2011, Berlin*. Berger C., Christ H.-J. eds. Berlin, Germany: DVM, 2011, 980 p.
19. Sulima A.M., Evstigneev M.I. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya i ustalostnaya prochnost' detalei iz zharoprochnykh i titanovykh splavov* [Surface layer quality and fatigue strength of parts made of heat-resistant and titanium alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 255 p. (In Russ.).
20. Yakovleva T.Yu., Matokhnyuk L.E. Prediction of fatigue characteristics of metals at different loading frequencies. *Strength of Materials*. 2004, vol. 36, no. 4, pp. 442–448.
21. Yasnii P.V., Marushchak P.O., Panin S.V., Lyubutin P.S., Baran D.Ya., Ovechkin B.B. The stages of material deformation and growth kinetics of fatigue crack in 25Kh1M1F steel at low loading frequencies. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2012, vol. 15, no. 2, pp. 97–107. (In Russ.).
22. Konovalov S., Aksenova K., Gromov V., Ivanov Yu., Semina O. The influence of electron beam treatment on alloy structure destroyed at high-cycle fatigue. *Key Engineering Materials*. 2016, vol. 675-676, pp. 655–659.
23. Mughrabi H., Christ H. - J. Cyclic deformation and fatigue of selected ferritic and austenitic steels; specific aspects. *ISIJ International*. 1997, vol. 37, no. 12, pp. 1154–1169.
24. Musuva J. K. Radon J. C. The effect of stress ratio and frequency on fatigue crack growth. *Fatigue of Eng. Materials and Structures*. 1979, vol. 1, pp. 457–470.
25. Marines I., Bin X., Bathias C. An understanding of very high cycle fatigue of metals. *International Journal of Fatigue*. 2003, vol. 25, no. 9-11, pp. 1101–1107.
26. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Variation in factors of fatigue resistance for some pure metals as a function of the frequency of loading cycles. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2010, vol. 51, no. 3, pp. 237–242.
27. Shetulov D.I. Relation of resistance to cyclic loading with metals surface damage. *Izv. Akademii Nauk. Metall.* 1991, no. 5, pp. 160. (In Russ.).
28. Myl'nikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Investigation into the surface damage of pure metals allowing for the cyclic loading frequency. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2013, vol. 54, no. 3, pp. 229–233.
29. Myl'nikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshev E.A. On evaluation of durability criteria in carbon steels. *Metals Technology*. 2010, no. 2, pp. 19–22.
30. Myl'nikov V.V., Chernyshov E.A., Shetulov D.I. Influence of cyclic loading frequency on fatigue resistance of high-strength structural materials. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2009, no. 2, pp. 33–36. (In Russ.).
31. Myl'nikov V.V. On the effect of load application frequency on fatigue resistance of materials. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2016, no. 6-2, pp. 202–205. (In Russ.).

Information about the authors:

V.V. Myl'nikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Building Technology" (mrmylnikov@mail.ru)

D.I. Shetulov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Materials Science, Technology of Materials and Heat Treatment of Metals" (shetulov@mail.ru)

O.B. Kondrashkin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Building Technology" (tsp-nngasu@mail.ru)

E.A. Chernyshov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgical Technology and Equipment" (taep@nntu.ru)

A.I. Pronin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Engineering Technology" (mdsov@knastu.ru)

Received February 5, 2018

Revised July 8, 2019

Accepted July 29, 2019