

Прогнозирование характеристик сопротивления усталости металлов в гигацикловой области по результатам высокочастотных испытаний. Сообщение 1. Экспериментальные результаты

Л. Е. Матохнюк, Т. Ю. Яковлева, А. В. Бялонович

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Исследовано влияние температуры, концентрации напряжений, структуры материала, состояния поверхности, асимметрии циклов на характеристики сопротивления усталости при высоко- и низкочастотном циклическом нагружении. Показано, что при идентичности условий испытаний относительное количественное влияние большинства конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов является одинаковым при всех частотах нагружения.

Ключевые слова: предел выносливости, частота нагружения, база испытаний, концентратор напряжений, асимметрия циклов, титановый сплав, режим термообработки.

Введение. Проблема усталости металлов и элементов конструкций из них в области долговечности, превышающей 10^9 цикл нагружения, обусловлена особенностями эксплуатации изделий, применяемых в энергетическом машиностроении, авиастроении и других отраслях промышленности. При числе циклов более $10^8 \dots 10^9$ могут происходить разрушения при напряжениях, которые значительно ниже установленного для этого материала предела выносливости на базе порядка 10^7 цикл [1–3] и др. Учитывая требования существенного повышения ресурса изделий при одновременном сокращении сроков и затрат на этапах проектирования и производства, необходимо располагать данными о поведении применяемых материалов в условиях циклического нагружения в течение предусмотренных сроков эксплуатации. Однако получить экспериментальные кривые усталости на указанных базах испытаний при рабочих частотах нагружения, составляющих единицы или десятки герц, практически нереально. Для проведения испытаний на базе $10^9 \dots 10^{10}$ цикл с частотами, предусмотренными действующими стандартами, т.е. составляющими десятки герц, потребуется несколько лет непрерывной работы испытательного оборудования. Очевидно, что в подобных случаях единственным способом экспериментального получения характеристик сопротивления усталости материалов на требуемых базах являются высокочастотные испытания. Однако при этом возникает вопрос о правомерности перенесения результатов высокочастотных испытаний на другие условия нагружения.

Методика исследований. С целью обоснования применимости методов высокочастотных испытаний к определению влияния различных факторов на сопротивление усталости металлических материалов был проведен комплекс исследований в широком диапазоне частот (от единиц герц до 10 кГц). При испытаниях с частотами, составляющими единицы герц, использовали маши-

ну с механическим нагружающим устройством, при 80...300 Гц – машину с электромагнитным силовозбудителем, 300...3000 Гц – электродинамический вибростенд, 10 кГц – установку с магнитострикционным возбудителем колебаний. Все испытательные машины были снабжены устройствами для автоматического поддержания параметров нагрузки, погрешность измерения и стабилизации амплитуды нагрузки не превышала 3% [4]. С целью исключения влияния формы и размеров образцов на сопротивление усталости при испытаниях на всех частотах нагружения использовали одинаковые образцы.

Проведены эксперименты по оценке применимости методов высокочастотного нагружения для установления влияния на характеристики сопротивления усталости следующих факторов: структуры материала, изменяемой путем различной термической и термомеханической обработки; концентрации напряжений; температуры испытаний; асимметрии циклов. Исследования проводили в основном на титановых сплавах. Это объясняется, во-первых, широким внедрением их в промышленность, во-вторых, они обладают, как правило, низким уровнем рассеяния энергии, что позволяет проводить испытания на высоких частотах нагружения, не прибегая к принудительному охлаждению, которое может вызывать искажение результатов испытаний, особенно на больших базах.

Влияние структуры материала. Для исследования применимости методов с целью количественного определения влияния вида структуры на характеристики сопротивления усталости использовали титановые сплавы, прошедшие различную термомеханическую обработку, а также разные полуфабрикаты.

На рис. 1 приведены результаты усталостных испытаний гладких образцов из сплава ВТ23, изготовленных из термоупрочненного прутка, термоупрочненной и отожженной плиты [4]. Не останавливаясь на режимах термообработки, обеспечивших получение различной структуры, сопоставим степень влияния структуры на пределы выносливости, полученные при испытаниях с частотами нагружения $f = 460$ Гц и 10 кГц на одной и той же базе нагружения – $2 \cdot 10^7$ цикл. Данные о механических свойствах материала и значения пределов выносливости приведены в табл. 1. Для оценки влияния структуры использовали коэффициент K_c , равный отношению пределов выносливости образцов из плиты к пределам выносливости образцов из прутка, структура которых была выбрана как базовая. Полученные данные свидетельствуют о влиянии частоты нагружения на сопротивление усталости: во всех случаях пределы выносливости при частоте нагружения 10 кГц выше, чем при 460 Гц. Однако сравнение коэффициентов K_c между собой показывает, что они практически одинаковы для обеих частот нагружения. Максимальное расхождение результатов испытаний по коэффициенту влияния структуры не превышает 5...10%, что обусловлено небольшим количеством испытанных образцов, а это существенно влияет на точность полученных данных.

Аналогичные результаты были получены при испытаниях $(\alpha + \beta)$ -титанового сплава ВТ22. Ковку заготовок на конечные размеры проводили по одинаковой технологии, а затем подвергали горячему деформированию отдельно при температурах 860 ($\alpha + \beta$ -область), 960 ($\beta \rightarrow \alpha + \beta$ -область) и 1100°C (β -область) при степени деформации 48%. После этого заготовки подвергали

Т а б л и ц а 1

Механические свойства образцов из сплава ВТ23 и пределы выносливости при различных частотах нагружения

Полуфабрикат	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	σ_{-1} , МПа	K_c
Термоупрочненный пруток	1179	1104	9,6	25,6	$\frac{567}{628}$	$\frac{1}{1}$
Плита отожженная	1010	939	12,0	26,5	$\frac{380}{456}$	$\frac{0,67}{0,72}$
					$\frac{438}{515}$	$\frac{0,77}{0,82}$
термоупрочненная	1226	1136	10,2	9,2	$\frac{438}{515}$	$\frac{0,77}{0,82}$

Примечание. Над чертой приведены данные при частоте нагружения 460 Гц, под чертой – при 10 кГц.

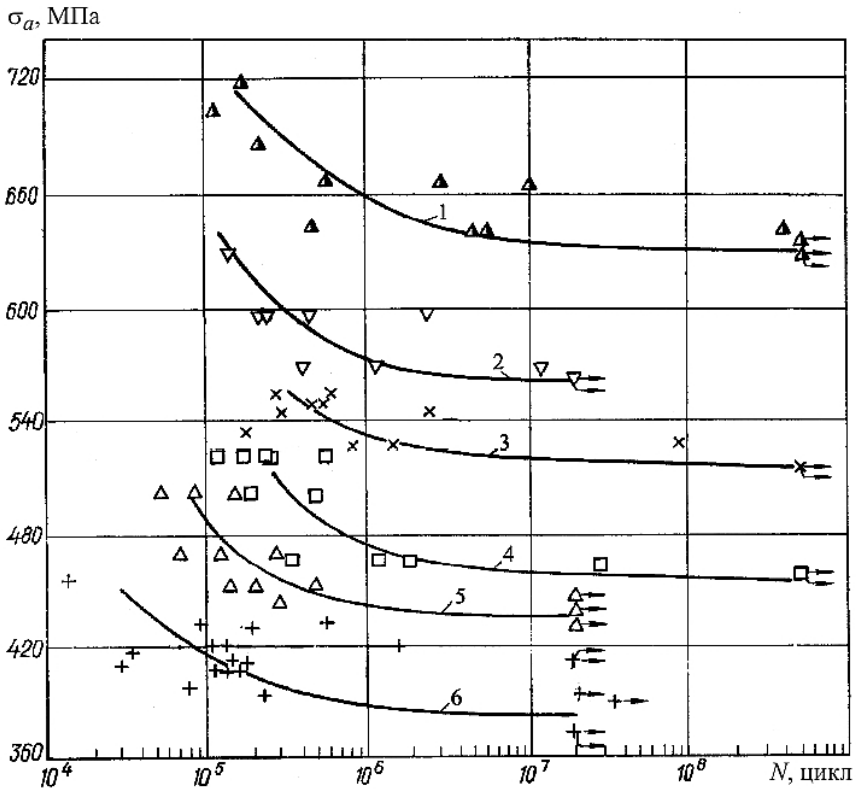


Рис. 1. Кривые усталости образцов из сплава ВТ23: 1, 2 – пруток упрочненный; 3, 5 – плита упрочненная; 4, 6 – плита отожженная. (1, 3, 4 – $f = 10$ кГц; 2, 5, 6 – $f = 460$ Гц.)

термической обработке в электрической камерной печи с воздушной атмосферой по следующим режимам.

1. Отжиг при температуре 825°C, выдержка в течение 2 ч, охлаждение с печью до 400°C, охлаждение на воздухе.

2. Нагрев до 825°C, выдержка 2 ч, охлаждение с печью до 750°C, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе.

3. Нагрев до 825°C, выдержка 2 ч, охлаждение с печью до 750°C, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе; нагрев до 480°C, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе.

Таким образом, на формирование структуры оказывают влияние температура отжига, температура начала ускоренного охлаждения на воздухе и температура старения.

Усталостные испытания проводили на двух частотах нагружения: 50 Гц [5] и 10 кГц [4] при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия. Значения пределов выносливости на базе 10^7 цикл представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Пределы выносливости образцов из сплава ВТ22 в зависимости от температуры деформации

№ режима термообработки	Температура деформации, °С	σ_B , МПа	$f = 50$ Гц		$f = 10$ кГц	
			σ_{-1} , МПа	K_c	σ_{-1} , МПа	K_c
1	860	1004	550	1,00	580	1,00
2		1172	580	1,05	615	1,07
3		1272	630	1,13	665	1,15
1	960	989	500	0,91	530	0,91
2		1210	560	1,02	595	1,03
3		1284	600	1,09	630	1,10
1	1100	965	470	0,86	505	0,87
2		1183	490	0,89	525	0,91
3		1236	550	1,00	575	0,98

Сравнение коэффициентов влияния структуры K_c , вычисленных как отношения пределов выносливости сплава на каждой из частот нагружения к пределам выносливости базового режима (температура деформации 860°C, режим термообработки № 1), показывает, что они для обеих частот практически одинаковы, т.е. влияние структурного состояния на сопротивление усталости оказывается в относительном выражении не зависящим от частоты воздействующей нагрузки.

Влияние состояния поверхности. Рассмотрим результаты испытаний при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия с частотами 180 Гц и 10 кГц гладких образцов из сплава ВТ6 после термической обработки по режимам, приведенным в табл. 3.

Результаты испытаний на усталость при частотах нагружения 180 Гц и 10 кГц приведены на рис. 2 и в табл. 3. В данном случае снижение пределов выносливости, вызванное вакуумным отжигом готовых образцов, составило 46%. Этому способствовало растравливание поверхности и обеднение поверхностных слоев легирующими элементами [6]. В то же время коэффициент влияния вакуумного отжига $K_{в.о}$ практически одинаков, несмотря на некоторое повышение пределов выносливости при высокочастотных испытаниях.

Т а б л и ц а 3

Пределы выносливости образцов из сплава ВТ6 в зависимости от режима термообработки и состояния поверхности

Режим термообработки заготовок и последовательность изготовления образцов	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	$f = 180$ Гц		$f = 10$ кГц	
					σ_{-1} , МПа	$K_{в.о}$	σ_{-1} , МПа	$K_{в.о}$
940°С, 2 ч, охлаждение на воздухе; 750°С, 2 ч, охлаждение на воздухе, изготовление образцов	997	948	16,2	45,0	545	1,00	585	1,00
940°С, 2 ч, охлаждение на воздухе, изготовление образцов; вакуумный отжиг готовых образцов при 750°С, 2 ч	997	947	16,4	45,8	290	0,53	325	0,55

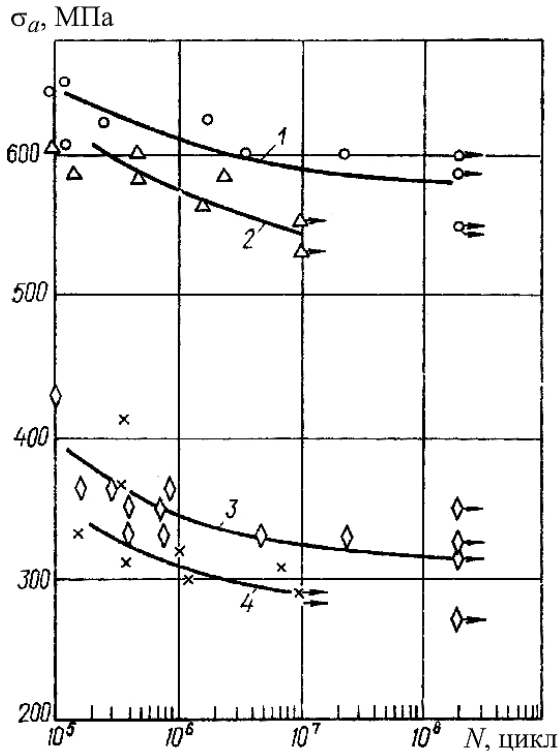


Рис. 2. Кривые усталости образцов из сплава ВТ6 после отжига заготовок на воздухе (1, 2) и готовых образцов в вакууме (3, 4): 1, 3 – $f = 10$ кГц, 2, 4 – $f = 180$ Гц.

Для оценки влияния процесса наводороживания материала как эксплуатационного фактора на сопротивление усталости в зависимости от частоты нагружения проведены испытания образцов из сплава ПТ7М в исходном и наводороженном состоянии. Степень наводороживания образцов характери-

зуется концентрацией водорода в металле после продолжительного отжига в печи с водородной атмосферой. Микроанализ методом вакуум-нагрева показал, что содержание водорода в рабочей части образцов составило 0,03% [7].

Усталостные испытания образцов проводили на гладких образцах и образцах с концентратором напряжений в виде кольцевой выточки глубиной 0,5 мм, радиусом 0,35 мм (теоретический коэффициент концентрации напряжений 2,6) при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия с частотами около 300 Гц и 10 кГц на базе $5 \cdot 10^7$ и 10^{10} цикл соответственно. Результаты испытаний приведены на рис. 3 и в табл. 4. С целью сопоставления результатов испытаний на различных частотах в табл. 4 представлены значения пределов выносливости на одинаковой базе – $5 \cdot 10^7$ цикл. Полученные данные свидетельствуют о том, что наводороживание образцов до концентрации 0,03% способствует увеличению сопротивления усталости сплава ПТ7М при всех режимах испытаний. Причины наблюдаемого явления рассмотрены ранее [4]. Отметим, что коэффициент влияния наводороживания K_B , равный отношению пределов выносливости образцов после наводороживающего отжига к пределам выносливости образцов из материала в исходном состоянии, практически одинаков при испытаниях на обеих частотах как для гладких образцов, так и для образцов с концентраторами напряжений, хотя частота нагружения больше влияет на пределы выносливости.

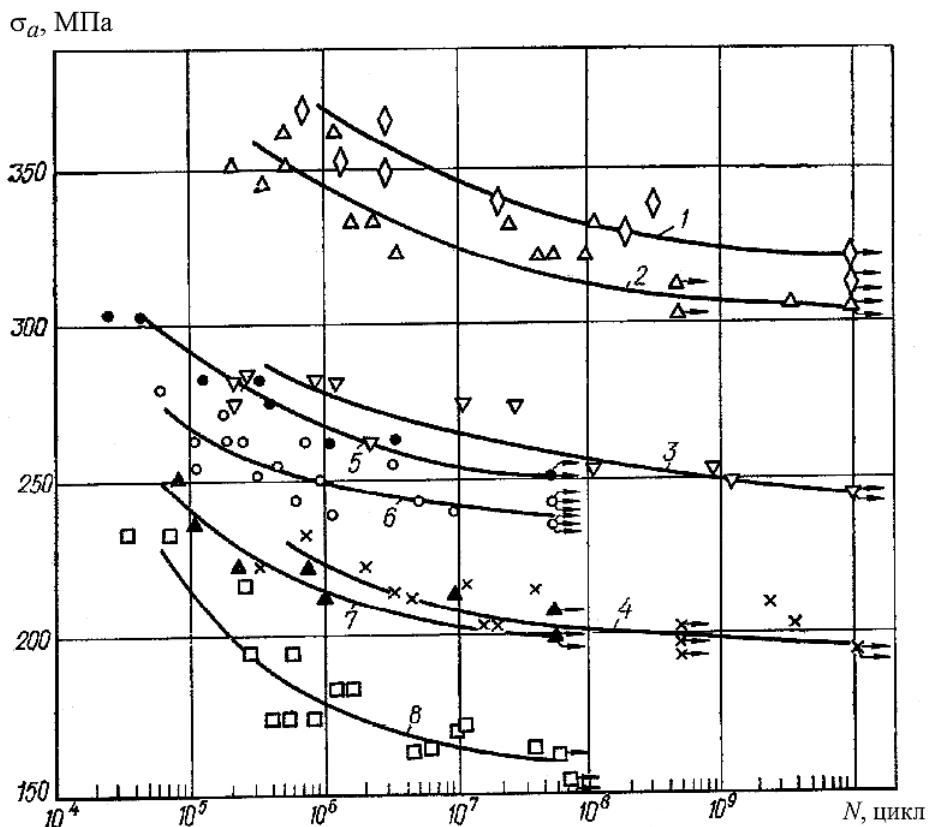


Рис. 3. Кривые усталости образцов из сплава ПТ7М в исходном (2, 4, 6, 8) и наводороженном (1, 3, 5, 7) состоянии: 1–4 – $f = 10$ кГц; 5–8 – $f = 300$ Гц.

Т а б л и ц а 4

Влияние наводороживания на пределы выносливости образцов из сплава ПТ7М при различных частотах нагружения

Вид образца	f , Гц	σ_{-1} , МПа	K_B
Гладкий, материал в исходном состоянии	10000	317	–
	300	240	–
Гладкий, наводороженный	10000	337	1,06
	300	250	1,04
С концентратором, материал в исходном состоянии	10000	205	–
	300	160	–
С концентратором, наводороженный	10000	257	1,25
	300	200	1,25

Влияние концентрации напряжений. Для проверки применимости методов высокочастотного нагружения с целью определения значения эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ проводили исследования для разных типов концентраторов напряжений в широком диапазоне изменения частот действующей нагрузки как при осевом растяжении–сжатии, так и изгибе в условиях комнатной и повышенной температур. Результаты усталостных испытаний представлены в табл. 5.

При симметричных циклах осевого растяжения–сжатия испытывали образцы с кольцевой выточкой ($K_\sigma = 2,6$), а также с плоской рабочей частью и цилиндрическим отверстием диаметром 2,5 мм ($K_\sigma = 3,1$). При циклическом изгибе (табл. 5) на разных частотах испытывали гладкие образцы из листового материала толщиной 3 мм и образцы с отверстием диаметром 1 мм, $K_\sigma = 2,7$ [8]. База испытаний для указанных в табл. 5 значений пределов выносливости для всех частот испытаний сплава одинакова и составляет $(1...5) \cdot 10^7$ цикл.

Данные, приведенные в табл. 5, свидетельствуют о том, что величины K_σ , определенные при различных частотах и видах нагружения, несмотря на влияние частоты на абсолютные значения пределов выносливости, различаются незначительно. Это подтверждает применимость методов высокочастотного нагружения к определению эффективного коэффициента концентрации напряжений.

Влияние температуры. Значительное влияние на сопротивление усталости материала оказывает температура испытаний. Рассмотрим, насколько применимы высокочастотные испытания при ускоренном количественном определении влияния данного фактора, что важно для установления температурного диапазона, в котором используется материал. Были проведены исследования по оценке влияния повышенных температур на значения пределов выносливости нескольких титановых сплавов, относящихся к различным группам по типу структуры, фазовому составу и уровню статической прочности, при частотах 250 Гц и 10 кГц (табл. 6). Испытания проводили при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия гладких образцов, имеющих одинаковый размер и диаметр рабочей части 7 мм [9].

Т а б л и ц а 5

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений, определенные при различных частотах нагружения

Сплав, вид нагружения	f , Гц	T , °С	σ_{-1} , МПа		K_{σ}
			гладкие образцы	образцы с концентратором	
ВТ20	33	20	269	168	1,60
	800	20	297	184	1,61
ВТ22	100	20	470	312	1,51
	20000	20	500	323	1,54
ВТ3-1	250	20	437	305	1,43
	3000	20	457	330	1,44
	10000	20	528	361	1,46
ВТ23 (плита)	460	20	380	230	1,65
	10000	20	456	292	1,56
ВТ23 (труба)	460	20	392	250	1,57
	10000	20	490	317	1,55
ПТ7М	250	20	235	155	1,52
	250	350	185	115	1,61
	3000	20	270	177	1,53
	10000	20	316	207	1,53
	10000	350	237	147	1,61
ИМВ-2	500	20	83	41	2,02
	10000	20	86	44	1,95
АМг6Н (пруток)	500	20	122	65	1,88
	10000	20	152	79	1,92
АМг6БМ (лист, вдоль прокатки, изгиб)	600	20	90	65	1,39
	2000	20	94	67	1,40
	2500	20	94	66	1,42

Из представленных в табл. 6 данных видно, что для каждого из испытанных материалов на обеих частотах нагружения получен практически одинаковый коэффициент влияния температуры K_T (отношение предела выносливости при повышенной температуре испытаний к пределу выносливости при комнатной температуре).

Влияние асимметрии циклов. Применимость методов высокочастотного нагружения при количественном определении влияния данного фактора на сопротивление усталости металлических материалов проверяли на алюминиевом сплаве АМг6Н и сплаве на никелевой основе ЭП202 [10, 11]. Испытывали как гладкие образцы, так и образцы с концентратором напряжений в виде кольцевой выточки ($K_{\sigma} = 2,6$) при осевом нагружении с частотой 33, 200 и 10000 Гц и коэффициентом асимметрии циклов $R = -1; 0$ и $0,5$. При симметричных циклах нагружения испытывали образцы также на промежуточных частотах – 500, 700 и 3000 Гц. Результаты испытаний приведены на рис. 4 в виде кривых частотной зависимости пределов выносливости σ_R на

Т а б л и ц а 6

Механические свойства и пределы выносливости образцов из титановых сплавов в зависимости от температуры

Сплав	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$\sigma_{-1}, \text{МПа}$	K_T
ПТ7М	20	530	437	21,5	48,8	$\frac{235}{316}$	$\frac{1,00}{1,00}$
	350	300	226	14,7	74,3	$\frac{185}{237}$	$\frac{0,79}{0,75}$
ВТ18У	20	1071	939	14,8	30,3	$\frac{345}{355}$	$\frac{1,00}{1,00}$
	350	823	681	21,8	40,9	$\frac{305}{325}$	$\frac{0,88}{0,91}$
	550	737	538	21,4	50,0	$\frac{260}{275}$	$\frac{0,75}{0,77}$
ВТ3-1	20	1070	995	15,5	16,5	$\frac{437}{528}$	$\frac{1,00}{1,00}$
	250	895	740	16,0	20,5	$\frac{370}{445}$	$\frac{0,85}{0,84}$
	450	715	557	18,5	36,5	$\frac{275}{342}$	$\frac{0,63}{0,65}$

Примечание. Над чертой приведены данные при $f = 250$ Гц, под чертой – при 10 кГц.

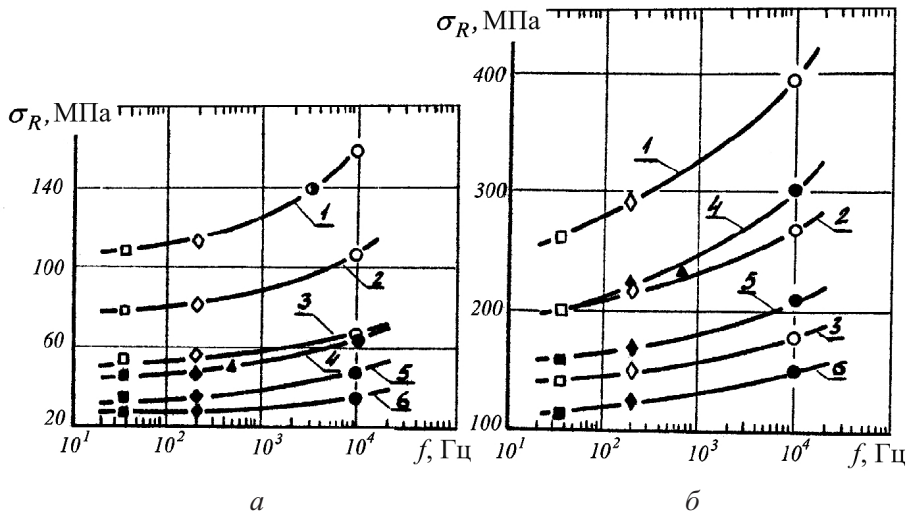


Рис. 4. Пределы выносливости образцов из сплавов АМг6Н (а) и ЭП202 (б) в зависимости от частоты нагружения: 1–3 – гладкие образцы; 4–6 – образцы с концентратором напряжений (1, 4 – $R = -1$; 2, 5 – $R = 0$; 3, 6 – $R = 0,5$).

базе $2 \cdot 10^7$ цикл и в табл. 7. Видно, что с повышением частоты нагружения пределы выносливости при всех коэффициентах асимметрии циклов монотонно увеличиваются (рис. 4). С ростом средних напряжений циклов влияние

Т а б л и ц а 7

Пределы выносливости сплавов АМг6Н и ЭП202 при различных частотах нагружения и коэффициентах асимметрии циклов

Сплав, вид образца	R	$f = 35$ Гц	$f = 200$ Гц	$f = 10000$ Гц
АМг6Н, гладкий	-1	$\frac{106}{1,00}$	$\frac{112}{1,00}$	$\frac{152}{1,00}$
	0	$\frac{77}{0,73}$	$\frac{80}{0,71}$	$\frac{105}{0,67}$
	0,5	$\frac{52}{0,49}$	$\frac{55}{0,42}$	$\frac{66}{0,42}$
АМг6Н, с концентратором	-1	$\frac{44}{1,00}$	$\frac{46}{1,00}$	$\frac{64}{1,00}$
	0	$\frac{33}{0,75}$	$\frac{35}{0,76}$	$\frac{45}{0,70}$
	0,5	$\frac{26}{0,59}$	$\frac{27}{0,57}$	$\frac{35}{0,55}$
ЭП202, гладкий	-1	$\frac{260}{1,00}$	$\frac{290}{1,00}$	$\frac{395}{1,00}$
	0	$\frac{200}{0,77}$	$\frac{215}{0,74}$	$\frac{270}{0,68}$
	0,5	$\frac{140}{0,54}$	$\frac{150}{0,52}$	$\frac{180}{0,46}$
ЭП202, с концентратором	-1	$\frac{200}{1,00}$	$\frac{220}{1,00}$	$\frac{305}{1,00}$
	0	$\frac{160}{0,80}$	$\frac{170}{0,77}$	$\frac{210}{0,69}$
	0,5	$\frac{115}{0,56}$	$\frac{125}{0,57}$	$\frac{150}{0,49}$

Примечание. Над чертой приведены данные для σ_R (МПа), под чертой – для K_R .

частоты нагружения на величину пределов выносливости уменьшается. Однако значения коэффициентов чувствительности к асимметрии циклов K_R , определенных как отношение предела выносливости при данном коэффициенте асимметрии цикла к его величине при симметричных циклах, колеблются в пределах погрешности измерений напряжений (в пределах 10%) при усталостных испытаниях (табл. 7). Постоянство K_R свидетельствует, что высокочастотные испытания позволяют провести ускоренное количественное определение влияния данного фактора на величину предела выносливости.

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что влияние большинства технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов на пределы выносливости в относительном выражении одинаково проявляется как на низких, так и высоких частотах нагружения.

Это свидетельствует о том, что основные механизмы накопления усталостных повреждений, характерные для данного материала, сохраняются независимо от частоты нагружения, а скорость деформирования влияет на величину неупругих деформаций и, следовательно, на степень накопленной за цикл пластической деформации и значения пределов выносливости. Если установить зависимость характеристик сопротивления усталости от частоты, можно прогнозировать поведение материала на базах воздействия циклической нагрузки, превышающих 10^9 цикл, с учетом влияния многих факторов по результатам только высокочастотных испытаний, не прибегая к трудоемким и длительным испытаниям на низких частотах.

Резюме

Досліджено вплив температури, концентрації напружень, структури матеріалу, стану поверхні, асиметрії циклів на характеристики опору втомі за високо- та низькочастотного циклічного навантаження. Показано, що при ідентичності умов випробувань відносний кількісний вплив більшості конструкційних, технологічних і експлуатаційних факторів є однаковим за всіх частот навантаження.

1. *Kanazawa K. and Nishijima S.* Fatigue fracture of low alloy steel at ultra-high cycle regime under elevated temperature conditions // J. Soc. Mater. Sci. – 1997. – **46**, No. 12. – P. 1396 – 1400.
2. *Sohar C. R., Betzwar-Kotas A., Gierl C., et al.* Gigacycle fatigue behavior of a high chromium alloyed cold work tool steel // Int. J. Fatigue. – 2008. – **30**, No. 7. – P. 1137 – 1149.
3. *Mayer H., Haydn W., Schuller R., et al.* Very high cycle fatigue properties of bainitic high carbon-chromium steel // Ibid. – 2009. – **31**, No. 2. – P. 242 – 249.
4. *Матохнюк Л. Е.* Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
5. *Маслов Л. И., Матвиенко А. Ф., Родионов Ю. В.* Сравнение работоспособности титановых сплавов в условиях подобия предельного состояния // Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. – М., 1981. – С. 143 – 161.
6. *Максимович Г. Г., Федирко В. Н., Лизун А. Т.* Влияние отжига в вакууме и в воздушной среде на усталостные свойства сплавов ВТ1-0 и ВТ14 // Циклическая прочность и повышение несущей способности изделий: Тез. докл. зональной конф. Урала. – Пермь, 1981. – С. 59.
7. *Вассерман А. М., Данилкин В. А., Коробов О. С. и др.* Методы контроля и исследования легких сплавов. – М.: Металлургия, 1985. – 510 с.
8. *Кульбашиный П. Ф., Писаренко Г. Г.* Характеристики выносливости листового сплава АМг6БМ с концентрацией напряжений в диапазоне частот 600–7500 Гц // Пробл. прочности. – 1974. – № 11. – С. 42 – 44.

9. Кузьменко В. А., Матохнюк Л. Е., Войналович А. В., Родионов Ю. В. Применение методов высокочастотного нагружения для ускоренного определения влияния технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов на сопротивление усталостному разрушению. Сообщ. 1 // Там же. – 1986. – № 3. – С. 26 – 30.
10. Кофто Д. Г. Влияние частоты и асимметрии циклического нагружения на сопротивление усталости сплава АМгбН // Там же. – 1990. – № 2. – С. 101 – 106.
11. Войналович А. В., Кофто Д. Г., Матохнюк Л. Е., Хляпов А. В. Влияние асимметрии цикла нагружения на сопротивление усталости сплавов ЭП202 и ВНС-25 при разных частотах нагружения // Там же. – № 8. – С. 84 – 89.

Поступила 15. 12. 2010