

Прогнозирование характеристик сопротивления усталости металлов при различных частотах нагружения

Т. Ю. Яковлева, Л. Е. Матохнюк

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

Предложена методика прогнозирования характеристик сопротивления усталости по результатам высокочастотных испытаний, в том числе на больших базах (до 10^{10} цикл). Методика основана на модели усталостного разрушения, учитывающей частоту и асимметрию циклов нагрузки. Возможности методики проиллюстрированы на примерах испытаний гладких образцов и образцов с концентратором напряжений из различных материалов (сплавы на основе никеля, алюминия и титана). Показано, что результаты прогноза для разных частот нагружения (35...10000 Гц) и коэффициентов асимметрии циклов ($-1...0,5$) отличаются, как правило, не более чем на 10% от экспериментально полученных значений этих параметров.

Ключевые слова: сопротивление усталости, предел выносливости, частота нагружения, коэффициент асимметрии циклов, коэффициент концентрации напряжений.

Введение. Сопротивление усталости металлов при различных частотах нагружения является предметом исследований уже длительное время [1]. Однако скорости циклического деформирования как одному из важных эксплуатационных факторов не уделялось должного внимания, хотя она может оказывать существенное влияние на характеристики сопротивления усталости. Так, предел выносливости титанового сплава ПТ7М, имеющего довольно высокую пластичность, повышается на 40% при увеличении частоты действующей нагрузки от 100 до 10000 Гц [2]. При этом изменений в механизмах накопления усталостных повреждений не наблюдается [3].

Изучение влияния частоты нагружения имеет большое научное и практическое значение. Высокочастотные испытания являются единственным реальным способом получения характеристик сопротивления усталости материалов на базах нагружения, превышающих $10^9...10^{10}$ цикл. Такие испытания необходимы для прогнозирования работоспособности изделий большого ресурса. В области долговечностей, превышающих общепринятые базы испытаний $10^7...10^8$ цикл, может наблюдаться изменение механизмов усталостного разрушения некоторых материалов, и как следствие – резкое снижение сопротивления усталости [4, 5], что может приводить к разрушению конструкции. Тем не менее в соотношениях, описывающих результаты усталостных испытаний, частота нагружения присутствует очень редко. Обширные исследования структуры, формирующейся в процессе циклического нагружения с различными частотами [6–11], послужили основой для разработки модели усталостного разрушения, позволяющей по результатам высокочастотных испытаний прогнозировать характеристики сопротивления усталости на более низких частотах.

Уравнение кривой усталости. Результаты многочисленных экспериментальных исследований [6] и детального анализа изменения физико-механических свойств и дислокационной структуры металлов [7–11] указывают на сохранение локального характера и последовательности структурных изменений в материале в диапазоне частот от десятков Гц до 10000 Гц. С учетом этого в аналитическом виде сформулирована физическая модель усталостного разрушения. Основное допущение модели заключается в представлении области локальной пластической деформации частицей квази-фазы, материал которой является сплошной средой. Геометрические размеры и свойства указанной частицы (или частиц, если разрушение много-очаговое) зависят от локального напряженного состояния, пластических и релаксационных свойств материала. В процессе циклического нагружения частицы квази-фазы развиваются и после определенного числа циклов приобретают критические свойства, становясь очагами усталостного разрушения.

В результате анализа условий энергетического баланса состояния материала квази-фазы для заданного критического числа циклов получено уравнение кривой усталости, в котором учтено влияние частоты нагружения и коэффициента асимметрии циклов

$$\sigma_a = \left(1 - k \frac{1+R}{2}\right) \sigma_{-1} + a\sqrt{f} + b\sqrt{\frac{1}{N_{Fr}}} + c\sqrt{\frac{f}{N_{Fr}}}, \quad (1)$$

где R – коэффициент асимметрии циклов; k – коэффициент чувствительности материала к асимметрии циклов; σ_{-1} – напряжения симметричных циклов, воздействие которых еще не вызывает усталостного разрушения при сколь угодно большом числе циклов нагрузки; a , b , c – параметры, зависящие от пластических и релаксационных свойств материала; f и N_{Fr} – частота и число циклов до разрушения (долговечность) соответственно. Следует заметить, что уравнение (1), как и другие уравнения кривых усталости, предусматривает сохранение основных механизмов накопления усталостных повреждений во всем рассматриваемом диапазоне долговечности.

Если в уравнении (1) зафиксировать значение частоты нагружения, при которой проводят испытания, получим уравнение кривой усталости

$$\sigma_a = \sigma_{a0} + \frac{C}{\sqrt{N_{Fr}}}, \quad (2)$$

т.е. уравнение с двумя параметрами, которые могут быть определены по результатам усталостных испытаний при двух уровнях нагрузки. Справедливость этого уравнения была проверена на большом объеме экспериментальных данных по усталости металлических материалов различных классов – сплавов на основе алюминия, никеля, магния, титана, железа, нержавеющей стали.

Экспериментальная проверка применимости уравнения (1) для прогнозирования сопротивления усталости материала при различных частотах

нагружения была проведена для сплавов на основе алюминия (АМг6Н, 01570), титана (ПТ7М) и никеля (ЭП202).

Материалы и методики испытаний. Механические свойства исследованных сплавов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Механические свойства сплавов

Сплав	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
ЭП202	1260	839	28,6	44,9
АМг6Н	390	337	9,6	15,4
01570	420	354	8,7	14,6
ПТ7М	530	437	21,5	48,8

Усталостные испытания при всех частотах нагружения проводили на одинаковых образцах. Это обеспечивало сопоставимость результатов, получаемых на различных машинах для усталостных испытаний. Диаметр рабочей части гладких цилиндрических образцов составлял 7 мм, длина – 50 мм. Образцы с концентратором напряжений имели такой же наружный диаметр и кольцевую выточку радиусом 0,35 мм (теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha = 2,7$).

Для усталостных испытаний с различными частотами нагружения применяли следующие машины. Частота нагружения 35 Гц обеспечивалась машиной МИР-СТ с механическим силовым возбудителем, более высокие частоты – машинами резонансного типа. Для испытаний с частотами 50...300 Гц применяли машину с электромагнитным возбудителем колебаний УРС-2, с частотами 500...600 Гц – машину на основе электродинамического вибростенда, с частотами 3000 и 10000 Гц – машины с магнитострикционными преобразователями. Машины резонансного типа были снабжены устройствами для обеспечения автоколебательного режима, которые поддерживали заданную амплитуду колебаний образцов, а соответственно и уровень нагрузки с погрешностью, не превышающей 3% [12].

Результаты усталостных испытаний. Испытания сплава ЭП202 проводили при симметричных ($R = -1$) и асимметричных циклах ($R = 0$ и $0,5$) осевого нагружения на гладких образцах и образцах с концентратором напряжений. При симметричных циклах частоты нагружения составляли 35, 200, 3000 и 10000 Гц, при асимметричных циклах – 35, 200 и 10000 Гц. Несмотря на довольно высокую пластичность сплава, существенного саморазогрева образцов при испытаниях даже на частотах 10000 Гц не наблюдалось, для поддержания теплового режима было достаточно охлаждения воздушной струей [13].

Результаты усталостных испытаний сплава ЭП202 приведены на рис. 1. С увеличением значения f во всем исследованном диапазоне частот и коэффициентов асимметрии циклов отмечается монотонное повышение пределов выносливости на одинаковой базе испытаний – в данном случае $2 \cdot 10^7$ цикл. При асимметричных циклах такое повышение менее существенно как в абсолютном, так и относительном выражении.

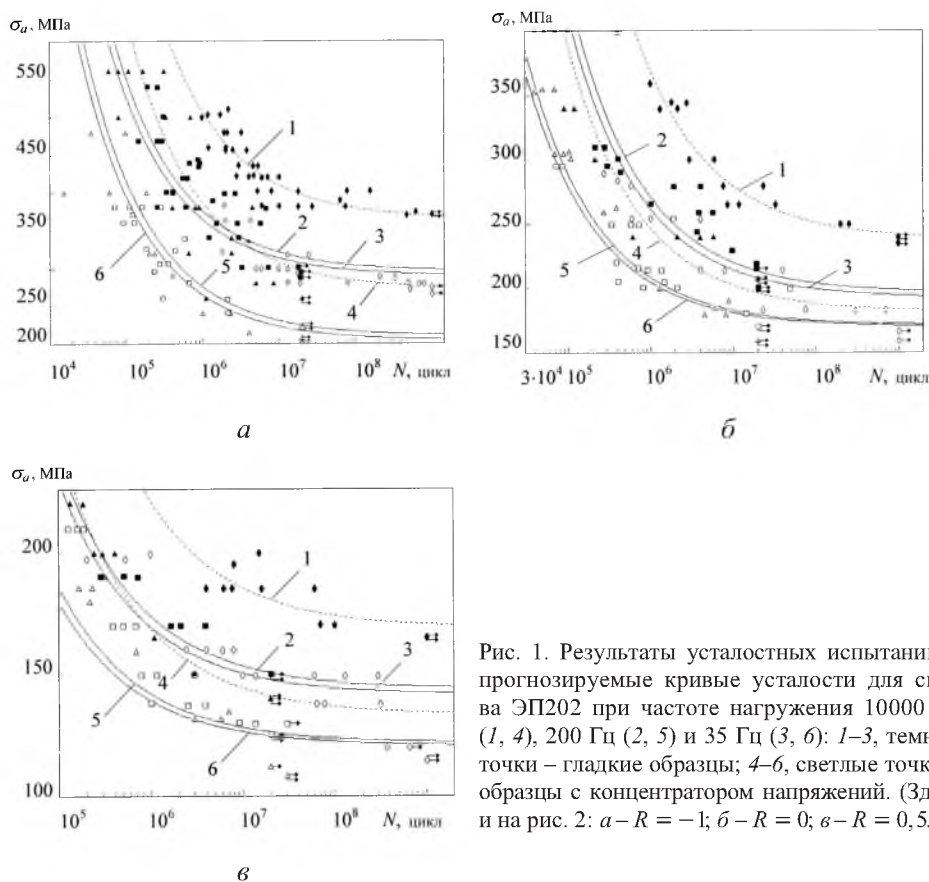


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний и прогнозируемые кривые усталости для сплава ЭП202 при частоте нагружения 10000 Гц (1, 4), 200 Гц (2, 5) и 35 Гц (3, 6): 1–3, темные точки – гладкие образцы; 4–6, светлые точки – образцы с концентратором напряжений. (Здесь и на рис. 2: а – $R = -1$; б – $R = 0$; в – $R = 0,5$.)

Алюминиевый сплав АМгбН испытывали также при симметричных и асимметричных циклах. Размеры образцов были такими же, как и в случае испытаний сплава ЭП202 [14]. При симметричных циклах частоты нагружения составляли 35, 200, 500, 3000 и 10000 Гц для гладких образцов и 35, 200, 500 и 10000 Гц для образцов с концентратором напряжений. Для получения надежных данных по усталости гладких образцов при частоте нагружения 3000 Гц испытывали по 7–14 образцов на трех уровнях напряжений. В случае асимметричных циклов ($R = 0$ и $0,5$) гладкие образцы и образцы с концентратором напряжений испытывали при частотах нагружения 35, 200 и 10000 Гц.

Результаты усталостных испытаний приведены на рис. 2. Большое количество использованных промежуточных частот подтверждает монотонность увеличения предела выносливости сплава с повышением частоты нагружения. В абсолютном выражении увеличение пределов выносливости гладких образцов больше, чем образцов с концентратором напряжений, при их сравнении на одной выбранной базе нагружения, например, $2 \cdot 10^7$ цикл. В то же время относительное изменение пределов выносливости при увеличении частоты нагружения составляет 44% для гладких образцов и 42% для образцов с концентратором, т.е. относительное влияние частоты нагружения на сопротивление усталости одинаково.

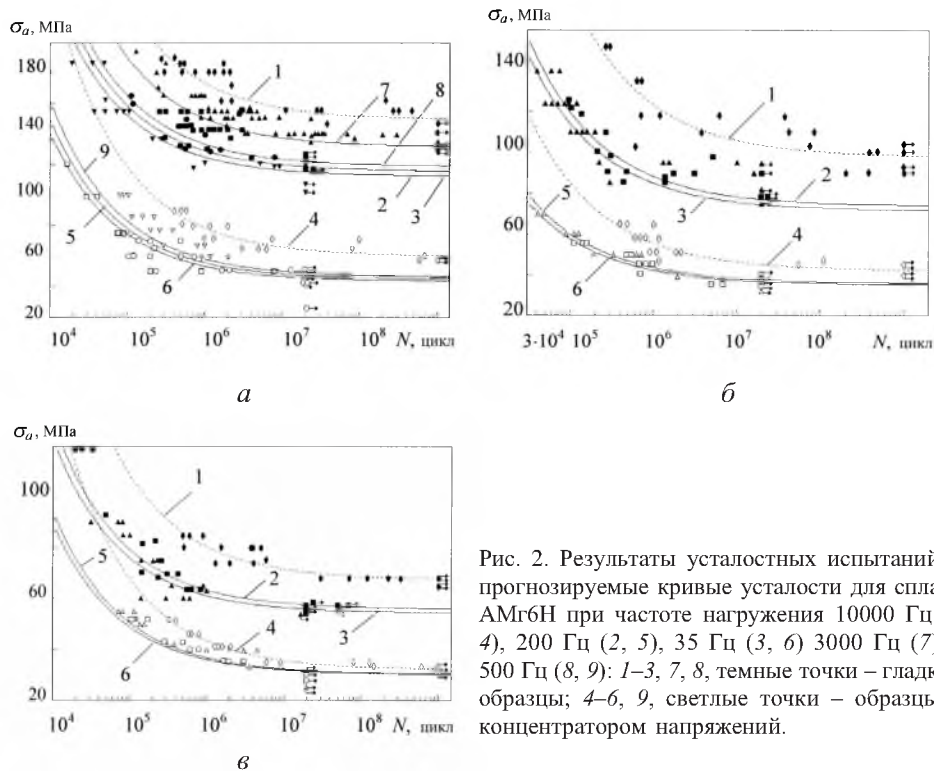


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний и прогнозируемые кривые усталости для сплава АМг6Н при частоте нагружения 10000 Гц (1, 4), 200 Гц (2, 5), 35 Гц (3, 6) 3000 Гц (7) и 500 Гц (8, 9): 1–3, 7, 8, темные точки – гладкие образцы; 4–6, 9, светлые точки – образцы с концентратором напряжений.

При асимметрии циклов сопротивление усталости сплава монотонно уменьшается с ростом величины среднего напряжения, что выражается в существенном снижении наклона кривых усталости при $R = 0,5$ (рис. 2, б, в). Это может быть связано с тем, что в данном случае максимальные напряжения в цикле с учетом статической составляющей близки к пределу текучести сплава АМг6Н. С увеличением коэффициента асимметрии циклов чувствительность сплава к концентрации напряжений уменьшается. Так, в случае испытаний с частотой 200 Гц эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ уменьшается на 20% при изменении коэффициента асимметрии циклов от -1 до $0,5$. Аналогичная картина наблюдается при испытаниях на других частотах. Сравнение коэффициентов K_σ , вычисленных для низких и высоких частот нагружения при каждом из значений R , показывает, что K_σ не зависит от частоты нагружения как в условиях симметричного, так и асимметричного нагружения.

Алюминиевый сплав 01570 испытывали при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия с частотами 35, 3000 и 10000 Гц. Использовали гладкие образцы, размеры которых были такими же, как и в случае испытаний сплава ЭП202. Результаты испытаний приведены на рис. 3. Как следует из приведенных данных, частота нагружения существенно влияет на сопротивление усталости сплава; монотонно возрастающая частотная зависимость пределов выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ цикл в диапазоне 35...10000 Гц близка к аналогичной зависимости для сплава АМг6Н, поскольку близки значения усталостных характеристик этих сплавов.

Низколегированный α -сплав титана ПТ7М применяется в основном для производства горячекатаных, холоднодеформированных и особо тонких труб [15]. Образцы для испытаний были такими же, как и применявшиеся в предыдущих экспериментах. Заготовки для них вырезали из прутков диаметром 110 мм вдоль их оси и отжигали при температуре 750°C в течение 2 ч.

Для оценки влияния частоты нагружения на сопротивление усталости испытывали гладкие образцы при частотах около 50, 300, 3000 и 10000 Гц. База испытаний на всех частотах, кроме 10000 Гц, составляла $5 \cdot 10^7$ цикл, на частоте 10000 Гц – 10^{10} цикл. Охлаждение водой применяли при испытаниях на всех частотах, чтобы устранить саморазогрев в случае высокочастотного нагружения и обеспечить сопоставимые условия испытаний.

Результаты усталостных испытаний сплава ПТ7М приведены на рис. 4. Как и при испытаниях других сплавов, наблюдается аналогичная закономерность – монотонное увеличение циклической долговечности с повышением частоты нагружения. Следует отметить, что разрушение образцов при испытаниях с частотой 10000 Гц происходит даже при числе циклов, равном $5 \cdot 10^9$.

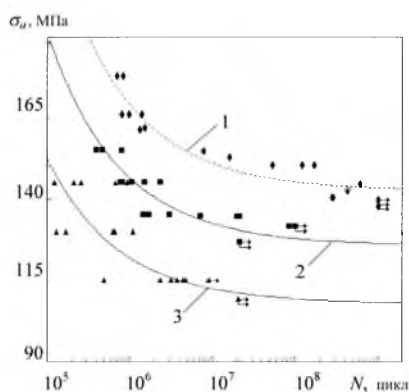


Рис. 3

Рис. 3. Результаты усталостных испытаний и прогнозируемые кривые усталости сплава 01570 при $R = -1$ и различной частоте нагружения: 1 – $f = 10000$ Гц; 2 – $f = 3000$ Гц; 3 – $f = 35$ Гц.

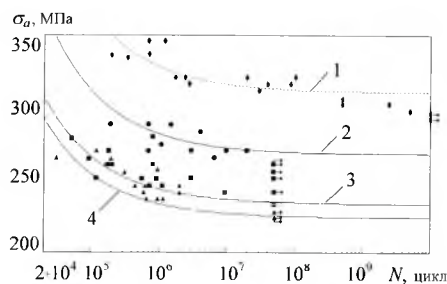


Рис. 4

Рис. 4. Результаты усталостных испытаний и прогнозируемые кривые усталости сплава ПТ7М при $R = -1$ и различной частоте нагружения: 1 – $f = 10000$ Гц; 2 – $f = 3000$ Гц; 3 – $f = 300$ Гц; 4 – $f = 500$ Гц.

Прогнозирование кривых усталости и их сопоставление с результатами испытаний. Положение кривых усталости при различных частотах нагружения представляется возможным прогнозировать, используя уравнение (1) и данные испытаний на одной из частот в выбранном диапазоне. Наибольший интерес представляет прогнозирование кривых усталости по результатам испытаний при высокочастотном нагружении. Такие испытания позволяют получать сведения о сопротивлении усталости за довольно короткое время. Так, для получения данных по усталости при нагружении образца с частотой 10000 Гц на базе 10^9 цикл необходимо всего 28 ч. Поэтому, используя данные испытаний при высокочастотном нагружении, можно

построить кривую усталости в широком диапазоне циклов – от 10^5 до 10^9 ... 10^{10} и установить, не изменяется ли механизм разрушения материала в области больших долговечностей и могут ли результаты усталостных испытаний быть описаны единой кривой либо ее необходимо разбивать на участки как в случаях, описанных в работах [4, 5].

Процедура прогнозирования кривых усталости по результатам высокочастотных испытаний состоит в следующем.

На одной частоте нагружения, являющейся верхней границей диапазона, проводят усталостные испытания в условиях, идентичных тем, при которых будет проводиться прогнозирование положения кривой усталости при низких частотах. Они включают размеры и форму образцов, наличие или отсутствие концентратора напряжений, температуру испытаний, характер окружающей среды, величину коэффициента асимметрии циклов. База нагружения должна быть не меньше базы, на которую осуществляется прогноз.

Чтобы получить коэффициенты уравнения (1), используем любую математическую программу, которая позволяет по табличным значениям аргумента и функции, т.е. по экспериментальным точкам, построить график функциональной зависимости заданного вида. Таким образом, с помощью экспериментальных данных и функции заданного вида получаем и решаем систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными. Точность вычисленных значений слагаемого σ_{-1} , коэффициентов a , b , c и, следовательно, точность прогноза зависят от уровня рассеяния результатов эксперимента. Особенно это относится к величине σ_{-1} (циклический предел упругости при $f \rightarrow 0$).

Подставив в (1) полученные величины σ_{-1} , a , b , c и значение частоты, для которой осуществляем прогнозирование, приводим (1) к виду (2), т.е. рассчитываем σ_{a0} и C в (2). Для двух произвольных значений долговечности N_{Fr1} , N_{Fr2} и известных коэффициентов σ_{a0} , C рассчитываем σ_{a1} , σ_{a2} , т.е. получаем две точки $\sigma_{a1}(N_{Fr1})$ и $\sigma_{a2}(N_{Fr2})$, которые задают форму и положение прогнозируемой кривой усталости.

Задавая две пары значений $N_{Fr1} - \sigma_{a1}$, $N_{Fr2} - \sigma_{a2}$ и используя уравнение (2) и ту же программу, что и для расчета коэффициентов, получаем прогнозируемую кривую усталости.

В качестве иллюстрации возможностей изложенной методики рассмотрим результаты прогнозирования для исследованных сплавов и сравним их с экспериментальными данными.

В табл. 2 приведены коэффициенты уравнения (1), определенные по экспериментальным данным для частоты нагружения 10000 Гц, а также рассчитанные по ним коэффициенты уравнения (2) для прогнозируемых частот нагружения каждого материала. На рис. 1–4 представлены кривые усталости при высокочастотном нагружении (пунктирные линии), по которым прогнозируются кривые усталости при низкочастотном нагружении (сплошные линии).

Результаты сравнения расчета с экспериментом на базе $2 \cdot 10^7$ цикл, которую обеспечивали для всех частот нагружения, приведены в табл. 2, где σ_a^p и σ_a^3 – значения предела выносливости, полученные по прогнозируемой и экспериментальной кривым усталости соответственно.

Параметры уравнений кривой усталости и сопоставление расчетных σ_a^p и экспериментальных σ_a^3 значений предела выносливости на базе $N = 2 \cdot 10^7$ цикл

Материал	Образец	R	f, Гц	Эксперимент (уравнение (1))				Прогноз (уравнение (2))		Предел выносли- вости		$\frac{\sigma_a^3 - \sigma_a^p}{\sigma_a^3}$, %	№ кривой на рис. 1-4	
				σ_{-1} , МПа	a, $\frac{\text{МПа}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	b, $\text{МПа}\sqrt{\text{цикл}}$	c, $\text{МПа}\sqrt{\frac{\text{цикл}}{\text{Гц}}}$	σ_{a0} , МПа	C, $\frac{\text{МПа}}{\sqrt{\text{Гц}}}$	σ_a^p , МПа	σ_a^3 , МПа			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
ЭП202	Гладкий	-1	10000	285	0,8053298	70873,453	708,87041						1,а, 1	
			200					296	80898	314	337	6,8	1,а, 2	
			35					290	75067	306	301	1,7	1,а, 3	
		0	10000	190	0,4847433	65342,201	652,50458							1,б, 1
			200					197	74570	214	230	6,9	1,б, 2	
			35					193	69202	208	228	8,8	1,б, 3	
		0,5	10000	140	0,2890810	26027,158	259,87230							1,в, 1
			200					144	29702	151	154	1,9	1,в, 2	
			35					142	27565	148	141	5,0	1,в, 3	
	С концент- ратором	-1	10000	200	0,7178480	56956,011	572,10140							1,а, 4
			200					210	65047	225	237	5,1	1,а, 5	
			35					204	60341	217	231	6,1	1,а, 6	
		0	10000	170	0,1207727	32520,965	326,33215							1,б, 4
			200					172	37136	180	192	6,3	1,б, 5	
			35					171	34451	178	177	0,6	1,б, 6	
		0,5	10000	120	0,1345279	17467,427	176,03598							1,в, 4
			200					122	19956	126	127	0,8	1,в, 5	
			35					121	18508	125	119	5,0	1,в, 6	

продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
АМг6Н	Гладкий	-1	10000	110	0.3967292	11869,1860	119,636920						2,а, 1	
			3000					132	18419	137	142	3,5	2,а, 7	
			500					119	14543	122	126	3,2	2,а, 8	
			200					116	13560	118,69	119,00	0,03	2,а, 2	
			35					112	12601	115	114	1,0	2,а, 3	
		0	10000	70	0.2811447	12625,9590	127,221180							2,б, 1
			200					74	14425	77	82	6,1	2,б, 2	
			35					72	13379	75	85	11,8	2,б, 3	
		0,5	10000	54	0.1351722	6447,8271	65,406588							2,в, 1
			200					56	7373	58	56	3,6	2,в, 2	
			35					54	6835	56	55	1,8	2,в, 3	
		С концент- ратором	-1	10000	43	0.1725438	9106,4362	92,049877						
	500							47	11165	49	50	2,0	2,а, 9	
	200							45	10408	48	45	6,7	2,а, 5	
	35							44	9650	46	41	12,2	2,а, 6	
	0		10000	35	0.0735573	6665,7216	67,633985							2,б, 4
			200					36	7622	38	36	5,5	2,б, 5	
			35					35	7066	37,0	37,3	0,8	2,б, 6	
0,5	10000		30	0.0208620	5581,9263	56,799971							2,в, 4	
	200						30,3	6385	32	31	3,2	2,в, 5		
	35						30,1	5818	31,0	30,6	1,3	2,в, 6		
01570	Гладкий		-1	10000	106	0.3677213	13216,3010	133,47954						3, 1
				3000					126	20527	126	133	5,3	3, 2
		35						108	14006	111	117	1,7	3, 3	
ПТ7М	Гладкий	-1	10000	219	0.9927406	9492,5189	96,258469						4, 1	
			3000					273	14764	272	276	1,4	4, 2	
			300					236	11159	239	249	4,0	4, 3	
			50					226	10172	228	243	6,1	4, 4	

Расхождение между данными расчета и эксперимента всего в двух случаях из 32 превышает 10% (максимум 12,2%), что вполне приемлемо для усталостных испытаний.

Заклучение. На основании анализа изменения физико-механических свойств и дислокационной структуры материала, подвергающегося циклическим нагрузкам, предложено уравнение кривой усталости, учитывающее влияние частоты и асимметрии циклов. Предложенное уравнение может использоваться для прогнозирования характеристик сопротивления усталости при различных частотах нагружения по результатам высокочастотных испытаний. Его применимость была проиллюстрирована на примере сплава на никелевой основе ЭП202, алюминиевых сплавов АМг6Н и 01570, титанового сплава ПТ7М. Гладкие образцы и образцы с концентратором напряжений из этих материалов были испытаны при симметричных и асимметричных циклах нагружения в диапазоне частот от 35...50 до 10000 Гц.

Резюме

Запропоновано методику прогнозування характеристик опору утомі за результатами високочастотних випробувань, у тому числі на великих базах (до 10^{10} цикл). Методика базується на моделі руйнування від утомленості з урахуванням частоти й асиметрії циклів навантаження. Можливості методики проілюстровано на прикладах випробувань гладких зразків та зразків із концентратором напружень із різних матеріалів (сплави на основі нікелю, алюмінію та титану). Показано, що результати прогнозу для різних частот навантаження (35...10000 Гц) та коефіцієнтів асиметрії циклу ($-1...0,5$), як правило, відрізняються від експериментальних значень не більше, ніж на 10%.

1. *Jenkin C. F.* High frequency fatigue tests // Proc. Roy. Soc. – 1925. – **109**, No. 749. – P. 119 – 143.
2. *Матохнюк Л. Е., Васинюк И. М., Войналович А. В., Соколинский А. Б.* Применение методов высокочастотного нагружения для прогнозирования долговечности материалов на больших базах // Пробл. прочности. – 1988. – № 3. – С. 58 – 63.
3. *Матохнюк Л. Е., Войналович А. В., Яковлева Т. Ю., Микушев А. А.* Влияние наводороживания на сопротивление усталости титанового сплава ПТ7М // Там же. – № 8. – С. 70 – 75.
4. *Wang Q. Y., Berard Y. Y., Dubarre A., et al.* Gigacycle fatigue of ferrous alloys // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1999. – **22**. – P. 667 – 672.
5. *Shiozawa K., Lu L., and Ishihara S.* *S – N* curve characteristics and substructure crack of a high carbon – chromium bearing steel // Ibid. – 2001. – **24**. – P. 781 – 790.
6. *Матохнюк Л. Е.* Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.

7. Яковлева Т. Ю., Матохнюк Л. Е. Оценка деградации структуры металлических материалов методом Фурье-анализа // Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций: Тр. конф. – Киев: Изд. Ин-та пробл. прочности НАН Украины. – 2000. – 1. – С. 193 – 197.
8. Яковлева Т. Ю. Дислокационная структура титанового сплава ВТ22 в условиях циклического нагружения с различными частотами // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 33 – 44.
9. Яковлева Т. Ю. Взаимосвязь микромеханизмов структурной перестройки титанового сплава ВТ18У в процессе усталостного нагружения // Там же. – № 6. – С. 73 – 83.
10. Матохнюк Л. Е., Войналович А. В., Яковлева Т. Ю. Сопротивление усталости материалов на больших базах нагружения // Завод. лаб. – 2004. – № 4. – С. 52 – 56.
11. Яковлева Т. Ю., Войналович О. В., Матохнюк Л. Е. Особливості формування дислокаційної структури нікелевого сплаву за дії циклічного навантажування // Металознавство та обробка металів. – 2001. – № 4. – С. 19 – 25.
12. Кузьменко В. А., Василюк И. М., Крук Б. З. Многоцикловая усталость при переменных амплитудах нагружения. – Киев: Наук. думка, 1986. – 264 с.
13. Войналович А. В., Кофто Д. Г., Матохнюк Л. Е., Хляпов А. А. Влияние асимметрии цикла нагружения на сопротивление усталости сплавов ЭП202 и ВНС-25 при разных частотах нагружения // Пробл. прочности. – 1990. – № 8. – С. 84 – 89.
14. Яковлева Т. Ю., Войналович О. В., Матохнюк Л. Е. Структурні зміни у сплаві АМг6Н за дії високочастотного асиметричного навантажування // Металознавство та обробка металів. – 2000. – № 4. – С. 12 – 19.
15. Титановые сплавы в машиностроении / Под ред. Г. И. Капырина. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.

Поступила 30. 08. 2003