

Определение характеристик сопротивления усталости металлов по результатам высокочастотных испытаний с учетом структурных и эксплуатационных факторов

Г. Г. Писаренко, Л. Е. Матохнюк

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

Приведены результаты исследования сопротивления усталости металлических материалов при частотах нагружения от единиц герц до 10 кГц с учетом состояния структуры, температуры испытаний, асимметрии циклов нагружения и наличия концентраторов напряжений. Показано, что влияние подавляющего большинства технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов на значения пределов выносливости одинаково проявляется как на низких, так и на высоких частотах нагружения. Это свидетельствует о том, что основные механизмы накопления усталостных повреждений, характерные для данного материала, сохраняются независимо от частоты нагружения, а скорость деформации влияет на величину неупругих деформаций и соответственно на степень накопленной за цикл пластической деформации и значения пределов выносливости. Представлено уравнение состояния материала для момента времени, непосредственно предшествующего старту усталостной трещины, которое учитывает частоту циклического нагружения как фактор, влияющий на скорость накопления повреждений. Экспериментальная проверка справедливости полученного уравнения показывает, что различие в расчетных и экспериментальных данных по сопротивлению усталости находится, как правило, в области разброса последних, что подтверждает обоснованность модели. Предложенная модель является основой для прогнозирования характеристик сопротивления усталости, в том числе на больших базах нагружения, при различных частотах по результатам высокочастотных испытаний.

Ключевые слова: сопротивление усталости, частота нагружения, высокочастотные испытания, накопление повреждений, локальная пластическая деформация, модель усталостного разрушения, уравнение кривой усталости.

Введение. В настоящее время задача получения достоверных данных по сопротивлению усталости конструкционных материалов остается актуальной для многих отраслей экономики Украины: атомной энергетики, космической, транспортной, машиностроительной промышленности и др. Материальные и временные затраты при проведении усталостных испытаний на эксплуатационных частотах нагружения, особенно на базах выше 10^7 цикл, очевидны. Отказаться от длительных испытаний, отдав преимущество расчетным методам, не удастся, так как необходимо учитывать разнообразные эксплуатационные, конструкционные и технологические факторы, которые влияют на характеристики сопротивления усталости металлических материалов. Особенно важно в некоторых случаях располагать экспериментальными данными по сопротивлению усталости материалов на больших базах нагружения ($10^8 \dots 10^9$ цикл), получение которых на частотах, предусмотренных стандартами, длительный и дорогостоящий процесс.

Однако в области долговечностей, превышающих общепринятые базы испытаний, могут происходить изменения механизмов усталостного разрушения некоторых материалов, приводящие к резкому падению сопротивления усталости [1, 2], и, как следствие, к разрушению конструкции. Получить необходимые экспериментальные данные на больших базах в достаточном объеме практически можно только при высокочастотных испытаниях.

С учетом этого перспективным является получение данных по сопротивлению усталости при испытаниях на высоких (от сотен герц до 10...20 кГц) частотах нагружения. Однако использовать эти результаты непосредственно в расчетах на прочность элементов конструкций не представляется возможным из-за влияния на величины предела выносливости материалов высокой скорости циклического нагружения [3, 4]. Для установления возможности их практического применения при оценке сопротивления усталости металлов был проведен большой объем экспериментальных исследований в широком диапазоне частот.

Методы испытаний. Экспериментальные исследования проводили при осевом нагружении образцов в широком диапазоне частот (от единиц герц до 10 кГц). Для испытаний на частотах единицы герц применяли машину с механическим нагружающим устройством, на частотах 80...300 Гц – машину с электромагнитным сило-возбудителем, 300...3000 Гц – электродинамический вибростенд, 10 кГц – установку с магнитоотрицательным возбудителем колебаний. Все испытательные машины были снабжены устройствами для автоматического поддержания параметров нагрузки, погрешность в измерении и стабилизации амплитуды нагрузки не превышала 3%. Для исключения влияния формы и размеров образцов на сопротивление усталости испытания на всех частотах нагружения проводили на образцах с одинаковой цилиндрической рабочей частью диаметром 7 мм. В случае необходимости при испытаниях на высоких частотах саморазогрев образцов вследствие гистерезисных потерь устраняли путем охлаждения потоком воздуха, а материалов, не подверженных коррозии, – водой.

Эксперименты проводили на различных частотах нагружения при влиянии следующих факторов: структуры материала, изменяемой путем различной термической и термомеханической обработки; состояния поверхности; концентрации напряжений; температуры испытаний; асимметрии циклов. Объектом исследования служили образцы из алюминиевого сплава АМг6Н, технически чистого титана ВТ1-0, сплавов на основе титана ПТ7М, ВТ18У, ВТ22, ВТ23, сплава на никелевой основе ЭП202, а также из магниевых сплавов ИМВ-2 и различных сталей.

Влияние частоты нагружения на сопротивление усталости. Испытаниям подвергали металлические материалы с целью установления зависимости влияния скорости циклического нагружения на характеристики сопротивления усталости при симметричных и асимметричных циклах осевого нагружения на частотах от десятков герц до 10 кГц. Использовали гладкие образцы и образцы с концентратором напряжений. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты определения предела выносливости образцов из сплавов АМг6Н и ЭП202 на одинаковой базе $2 \cdot 10^7$ цикл при различных частотах нагружения f и коэффициентах асимметрии цикла R [5].

Результаты испытаний показывают, что при соблюдении идентичности условий испытаний пределы выносливости всех исследованных материалов монотонно возрастают с повышением частоты нагружения [3, 5–7]. Многие авторы объясняют это тем, что пластическая деформация в процессе цикла изменения нагрузки при высоких частотах меньше, чем при низких, из-за малого времени пребывания материала под действием максимальной нагрузки. В результате она не успевает завершиться в такой же степени, как при низких частотах [3, 8, 9 и др.]. Степень такого влияния для материалов с разными уровнями их прочности и пластичности неодинакова. Так, предел выносливости на базе $2 \cdot 10^7$ цикл гладких образцов из низколегированного титанового сплава ПТ7М с повышением частоты нагружения от 200 до 10000 Гц возрастает с 230 до 325 МПа, т.е. более чем на 40% [10], в то время как для таких же образцов из высокопрочного титанового сплава ВТ23 – от 570 до 645 МПа, т.е. примерно на 13% [3]. Если проследить за степенью влияния скорости циклического деформирования по классам материалов, то можно отметить, что повышение частоты нагружения больше всего сказывается на пределе выносливости образцов из сталей, меньше – на образцах из магниевых, алюминиевых и высокопрочных титановых сплавов.

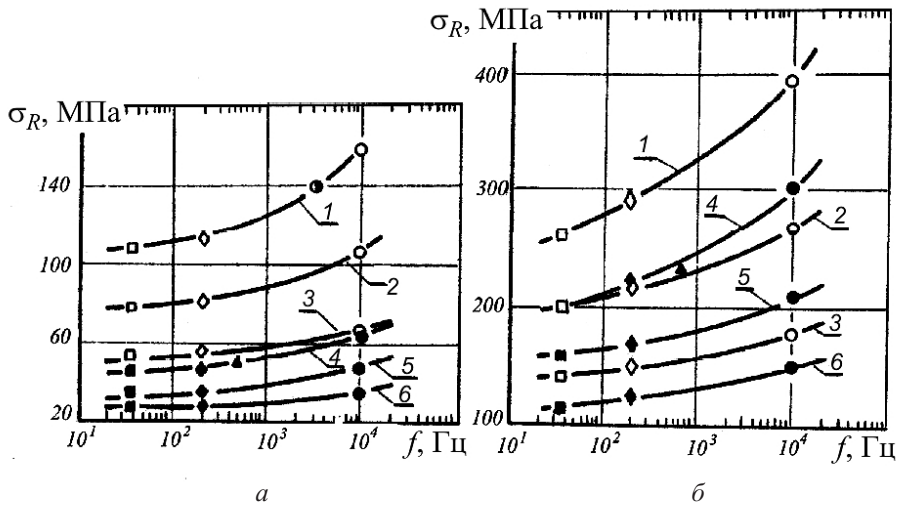


Рис. 1. Зависимость предела выносливости σ_R образцов из сплавов АМг6Н (а) и ЭП202 (б) от частоты нагружения f : 1–3 – гладкие образцы; 4–6 – образцы с концентратором напряжений (1, 4 – $R = -1$; 2, 5 – $R = 0$; 3, 6 – $R = 0,5$).

Закономерности эволюции структуры материалов при различных частотах нагружения. Исследования дислокационной структуры сплавов на основе титана, алюминия и никеля, испытанных в диапазоне частот 35...10000 Гц, показывают, что в зависимости от кристаллографии, примесных и легирующих элементов, соотношения фазовых составляющих деформация при циклическом нагружении происходит вследствие различных преобладающих механизмов: отрыв от точек закрепления и размножение дислокаций, активизация вторичных систем скольжения для технически чистого титана [4]; формирование призматических петель, ячеистой структуры и плоских дислокационных скоплений в низколегированном титановом сплаве ПТ7М [4]; разрушение частиц интерметаллида, деформация межфазных границ и прилегающих к ним областей в двухфазных титановых сплавах ВТ18У, ВТ3-1 и ВТ22 [11, 12]; формирование дислокационных стенок и свободных от дислокаций каналов, элементарных конфигураций и ячеистой структуры в алюминиевом сплаве АМг6 [13]; распад упрочняющей интерметаллидной вторичной фазы со свободными от выделений зонами вблизи границ зерен в жаропрочном никелевом сплаве ЭП202 [14].

Тем не менее, несмотря на различия в механизмах накопления повреждений, прослеживаются и общие закономерности. Это, прежде всего, локальный характер явно выраженных структурных изменений [4, 15, 16]. Независимо от условий нагружения эволюция структурных параметров, т.е. развивающаяся микропластическая деформация, наблюдается в ограниченном числе микрообъемов при наличии значительно большего количества возникающих, но не развивающихся областей структурных изменений и практически неизменного состояния остального материала. Особенностью этих микрообъемов является повышенная чувствительность к внешним нагрузкам: благоприятная локальная кристаллографическая ориентация; локальная концентрация напряжений; близость к свободной поверхности материала [16, 17].

Установленный частотно-независимый характер интегральной плотности дислокаций при одновременном росте удельного остаточного электросопротивления [4] свидетельствует о том, что несмотря на макроскопически упругое поведение материала, результаты процессов локальной пластической деформации значимы и приводят к изменению интегральных макроскопических характеристик [18], а разрушение наступает по достижении определенного критического структурного состояния

материала в определенных микрообъемах. Это подтверждается также результатами исследований методом Фурье-анализа эволюции структуры сталей и алюминиевого сплава в процессе циклического нагружения [19, 20].

Прогнозирование характеристик сопротивления усталости металлов при различных частотах нагружения по результатам высокочастотных испытаний. Локальный характер развивающихся микроструктурных изменений при практически стабильном состоянии остального материала позволяет рассматривать микрообласти с существенно измененной структурой как частицы, обладающие выраженной граничной поверхностью и внутренней энергией, отличающейся от таковой остального материала. С учетом этого в аналитическом виде сформулирована физическая модель усталостного разрушения [4, 21], в которой области локальной пластической деформации представлены как частицы квазифазы, а ее материал является сплошной средой. Геометрические размеры и свойства этих частиц зависят от локального напряженного состояния, пластических и релаксационных свойств материала. Развиваясь вследствие циклических нагрузок, частицы квазифазы после определенного числа циклов накапливают критическую энергию и становятся очагами усталостного разрушения.

На основе анализа энергетического баланса состояния материала квазифазы для критического числа циклов нагружения до разрушения N_{fr} и асимметрии циклов [4] получено уравнение кривой усталости, учитывающее влияние частоты f :

$$\sigma_a = \sigma_e + a_\sigma \sqrt{f} + b_\sigma \sqrt{\frac{1}{N_{fr}}} + c_\sigma \sqrt{\frac{f}{N_{fr}}}. \quad (1)$$

Здесь

$$a_\sigma = k \sqrt{\frac{E_\omega \operatorname{tg} \varphi}{3\nu_0} \frac{\partial \alpha}{\partial N}}; \quad b_\sigma = k \sqrt{\frac{E_r}{3\nu_0} \frac{\partial \alpha}{\partial T}}; \quad c_\sigma = k \sqrt{\frac{E_\omega \operatorname{tg} \varphi}{3} \frac{\partial \alpha}{\partial \nu_0}}; \quad \sigma_e = k \sigma_{e/-1},$$

где E_ω – динамический модуль упругости; E_r – релаксированный модуль, соответствующий условиям полной завершения релаксационных процессов; φ – угол сдвига фаз между напряжением и деформацией; k – коэффициент чувствительности материала к асимметрии циклов; α – удельная поверхностная энергия области локальной пластической деформации; T – период циклов нагружения, ν_0 – средняя скорость процессов микропластической деформации; $\sigma_{e/-1}$ – амплитудное значение напряжений для симметричных циклов.

Уравнение (1) преобразуем к простейшему виду:

$$\sigma_a = \sigma_{ue} + \frac{C_f}{\sqrt{N_{fr}}}, \quad (2)$$

где

$$\sigma_{ue} = \sigma_e + a_\sigma \sqrt{f}; \quad C_f = b_\sigma + c_\sigma \sqrt{f}.$$

Выражение (2) представляет собой уравнение кривой усталости с двумя коэффициентами для заданных условий мягкого нагружения. Возможность его применения для аппроксимации экспериментально полученных результатов усталостных испытаний проверена практически на металлических материалах всех классов при различных частотах нагружения, температурах, коэффициентах асимметрии циклов, а также на сварных соединениях. Способы нагружения следующие: осевое растяжение–

сжатие; изгиб плоских образцов; изгиб с вращением. Установлено, что выражение (2) хорошо соответствует результатам усталостных испытаний [4]: коэффициент корреляции находился, как правило, в пределах 0,85...0,98. Это означает, что математическая форма уравнений (1) и (2) отражает реальную функциональную зависимость между напряжением и числом циклов до разрушения для металлических материалов, находящихся в разных структурных состояниях и в различных по напряженному состоянию и характеристикам окружающей среды условиях испытаний.

Параметры, входящие в выражения для коэффициентов основного уравнения (1), описывают физико-кристаллографические особенности процессов в области локальной пластической деформации и зависят от принципиальных факторов нагружения. Поэтому коэффициенты уравнения (1) можно рассматривать как постоянные материала в определенных границах условий испытаний: температурный интервал; диапазон частот нагружения; уровень внешней нагрузки; характер окружающей среды. Конкретные характеристики диапазона и условий испытаний, в которых указанные коэффициенты принимаются постоянными, зависят от класса материала.

Отличительной особенностью уравнения (1) является то, что частота f играет роль не эмпирического параметра, как во многих уравнениях, а математически учебного фактора, влияющего на релаксационные свойства материала, которые проявляются в условиях циклического нагружения. Поэтому данное уравнение можно рассматривать в качестве математической основы прогнозирования характеристик сопротивления усталости материала при различных частотах по результатам высокочастотных испытаний.

Если определить постоянные в (1), получим уравнение кривой усталости, в которое входит частота нагружения f в явном виде. Это позволяет, задавая значение частоты, построить кривую усталости на нужной частоте. Значения постоянных можно определить, не прибегая к усталостным испытаниям, с помощью физических методов исследований. Однако такая задача является очень сложной, особенно для легированных сплавов. Поэтому значительно проще определить величины коэффициентов по результатам испытаний с высокой частотой нагружения, например 10 кГц, на базах от 10^5 до $10^9 \dots 10^{11}$ цикл. При этом на основании эксперимента можно также выяснить, не изменяется ли механизм усталостного разрушения материала в гигацикловой области и можно ли аппроксимировать полученные результаты единой кривой. В случае если кривая усталости имеет разрыв, ее следует разбить на участки.

Предложенный способ прогнозирования характеристик сопротивления усталости на больших базах нагружения проверен на основе большого объема экспериментального материала, полученного в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, и данных литературных источников [21]. В результате установлена его практическая применимость.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты прогнозирования сопротивления усталости сплава 01570 на частотах нагружения 3 кГц и 35 Гц по данным испытаний сплава на частоте 10 кГц. Кривая усталости I на частоте 10 кГц аппроксимирует экспериментальные результаты уравнением (2), а по четырем точкам этой кривой рассчитаны коэффициенты уравнения (1) и построены расчетные кривые усталости на частотах 35 и 3000 Гц. Расчетные кривые усталости хорошо соответствуют эксперименту.

Количественное определение влияния технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов на сопротивление усталости при высокочастотных испытаниях. Были проведены эксперименты по определению влияния следующих факторов на характеристики сопротивления усталости: структуры материала, изменяемой путем различной термической и термомеханической обработки; концентрации напряжений; температуры испытаний; асимметрии циклов. Исследовали в основном титановые сплавы. Это обусловлено, во-первых, широким внедрением сплавов

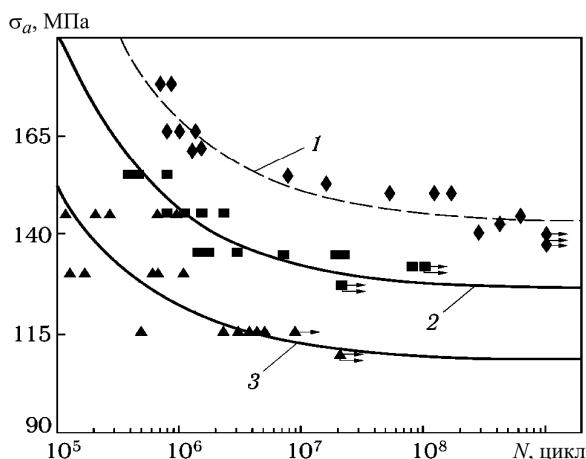


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний (точки) и прогнозируемые кривые усталости (сплошные линии) сплава 01570 при $R = -1$ и различной частоте нагружения: 1 – $f = 10$ кГц; 2 – $f = 3$ кГц; 3 – $f = 35$ Гц.

титана в промышленность, а, во-вторых, тем, что они обладают, как правило, низким уровнем рассеяния энергии. Это позволяет испытывать их на высоких частотах нагружения, не прибегая к принудительному охлаждению, которое может исказить полученные результаты.

Влияние структуры материала. Возможность применения методов высокочастотного нагружения для количественного определения влияния вида структуры на характеристики сопротивления усталости исследовали на образцах из титановых сплавов, прошедших различную термомеханическую обработку.

Испытывали гладкие образцы из сплава ВТ23, изготовленные из следующих полуфабрикатов: термоупрочненного прутка; термоупрочненной и отожженной плиты [3]. Не останавливаясь на режимах термообработки сплава для получения различной структуры, сравним степень влияния структуры на пределы выносливости при испытаниях с частотами нагружения 460 Гц и 10 кГц на одной и той же базе нагружения – $2 \cdot 10^7$ цикл. Данные о пределах прочности и пределах выносливости образцов из сплавов ВТ23 и ВТ22 приведены в табл. 1. Влияние структуры оценивали с помощью коэффициента $K_{стр}$, равного отношению пределов выносливости образцов из плиты к таковому образцов из прутка, структура которого 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. Сравнение коэффициентов $K_{стр}$ между собой показывает, что для обеих частот нагружения они практически одинаковы. Максимальное различие в результатах испытаний по коэффициенту влияния структуры не превышает 5...10%, что находится в пределах погрешности определения пределов выносливости.

Аналогичные результаты были получены при испытаниях $(\alpha + \beta)$ -титанового сплава ВТ22. Ковку заготовок на конечные размеры проводили по одинаковой технологии, а затем отдельные заготовки подвергали горячему деформированию при температурах 860°C ($\alpha + \beta$ -область), 960°C ($\beta \rightarrow \alpha + \beta$ -область) и 1100°C (β -область) при степени деформации 48%. После этого заготовки термически обрабатывали в электрической камерной печи с воздушной атмосферой по следующим режимам.

1. Отжиг при температуре 825°C, выдержка 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.

Т а б л и ц а 1

**Пределы прочности и выносливости образцов из сплавов ВТ23 и ВТ22
при различных частотах нагружения**

Полуфабрикат	Состояние, № режима термообработки	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	$K_{стр}$
Прутки из сплава ВТ23	Термоупрочненное	1179	$\frac{567}{628}$	$\frac{1,00}{1,00}$
Плита из сплава ВТ23	Отожженное	1010	$\frac{380}{456}$	$\frac{0,67}{0,72}$
	Термоупрочненное	1226	$\frac{438}{515}$	$\frac{0,77}{0,82}$
ВТ22, поковка, температура деформации 860°C	№ 1	1004	$\frac{550}{580}$	$\frac{1,00}{1,00}$
ВТ22, поковка, температура деформации 860°C	№ 2	1172	$\frac{580}{615}$	$\frac{1,05}{1,07}$
ВТ22, поковка, температура деформации 860°C	№ 3	1272	$\frac{630}{665}$	$\frac{1,13}{1,15}$
ВТ22, поковка, температура деформации 960°C	№ 1	989	$\frac{500}{530}$	$\frac{0,91}{0,91}$
ВТ22, поковка, температура деформации 960°C	№ 2	1210	$\frac{560}{595}$	$\frac{1,02}{1,03}$
ВТ22, поковка, температура деформации 960°C	№ 3	1284	$\frac{600}{630}$	$\frac{1,09}{1,10}$
ВТ22, поковка, температура деформации 1100°C	№ 1	989	$\frac{470}{505}$	$\frac{0,86}{0,87}$
ВТ22, поковка, температура деформации 1100°C	№ 2	1183	$\frac{490}{525}$	$\frac{0,89}{0,91}$
ВТ22, поковка, температура деформации 1100°C	№ 3	1236	$\frac{550}{575}$	$\frac{1,00}{0,98}$

Примечание. Для сплава ВТ23: над чертой приведена частота нагружения 460 Гц, под чертой – 10 кГц; для сплава ВТ22: над чертой – частота нагружения 50 Гц, под чертой – 10 кГц.

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, а также температура старения.

Усталостные испытания проводили на двух частотах нагружения: 50 Гц [22] и 10 кГц [3] при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия. Значения пределов выносливости на базе 10^7 цикл приведены в табл. 1.

Сравнение коэффициентов влияния структуры $K_{стр}$, вычисленных как отношение пределов выносливости сплава на каждой из двух частот нагружения к пределам выносливости образцов базового режима (температура деформирования

860°C, режим термообработки № 1), показывает, что они для обеих частот практически одинаковы, т.е. влияние структурного состояния на сопротивление усталости не зависит от частоты воздействующей нагрузки.

Влияние состояния поверхности образцов. Испытывали гладкие образцы из сплава ВТ6 после термической обработки по режимам, приведенным в табл. 2, при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия с частотами 180 Гц и 10 кГц. Данные испытаний на усталость при указанных частотах нагружения представлены также в табл. 2. В результате этих испытаний снижение пределов выносливости, вызванное вакуумным отжигом готовых образцов, составляет 46%. Это обусловлено тем, что при вакуумном отжиге происходит растравливание поверхности, обеднение поверхностных слоев легирующими элементами [23]. Отметим, что коэффициент влияния вакуумного отжига $K_{п}$, определенный при различных частотах нагружения, практически одинаков, несмотря на некоторое повышение пределов выносливости при высокочастотных испытаниях.

Т а б л и ц а 2

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 , %	σ_{-1} , МПа	$K_{п}$
Нагрев до 940°C, 2 ч, охлаждение на воздухе; до 750°C, 2 ч, охлаждение на воздухе; изготовление образцов	997	948	16,2	45,0	545	1,00
					585	1,00
Нагрев до 940°C, 2 ч, охлаждение на воздухе; изготовление образцов; вакуумный отжиг готовых образцов при 750°C, 2 ч	997	947	16,4	45,8	290	0,53
					325	0,55

Примечание. Над чертой приведены данные, полученные при $f = 180$ Гц, под чертой – при $f = 10$ кГц.

Влияние концентрации напряжений. Для количественного определения значения эффективного коэффициента концентрации напряжений K_{σ} проводили испытания образцов с разными типами концентраторов напряжений в широком диапазоне изменения частот воздействующей нагрузки при осевом растяжении–сжатии в условиях комнатной и повышенных температур. Результаты усталостных испытаний приведены в табл. 3.

При симметричных циклах осевого растяжения – сжатия испытывали образцы с кольцевой выточкой (теоретический коэффициент концентрации напряжений 2,6), а также с плоской рабочей частью и цилиндрическим отверстием диаметром 2,5 мм (теоретический коэффициент концентрации напряжений 3,1). База испытаний для указанных в табл. 3 значений пределов выносливости составляет $(1...5) \cdot 10^7$ цикл, причем для каждого сплава она одинакова на всех частотах нагружения.

Данные, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что величины K_{σ} , определенные при различных частотах нагружения, несмотря на влияние частоты на абсолютные значения пределов выносливости, мало различаются между собой. Это подтверждает применимость методов высокочастотного нагружения при количественном определении такого фактора, как эффективный коэффициент концентрации напряжений.

Т а б л и ц а 3

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений, определенные при различных частотах нагружения

Сплав	Частота нагружения f , Гц	Температура испытаний, °С	σ_{-1} , МПа		K_{σ}
			Гладкие образцы	Образцы с концентратором	
BT20	33	20	269	168	1,60
	800	20	297	184	1,61
BT22	100	20	470	312	1,51
	20000	20	500	323	1,54
BT3-1	250	20	437	305	1,43
	3000	20	457	330	1,44
	10000	20	528	361	1,46
BT23 (плита)	460	20	380	230	1,65
	10000	20	456	292	1,56
BT23 (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

Влияние температуры. Проведены испытания 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, на частотах 250 и 10000 Гц (табл. 4). Испытания выполнены при симметричных циклах осевого растяжения–сжатия гладких образцов одинакового размера с диаметром рабочей части 7 мм [6].

Из приведенных в табл. 4 данных видно, что для каждого из испытанных материалов на обеих частотах нагружения коэффициент влияния температуры K_T (отношение предела выносливости при повышенной температуре испытаний к пределу выносливости при комнатной температуре) является практически одинаковым.

Влияние асимметрии циклов. Испытывали гладкие образцы и образцы с концентратором напряжений в виде кольцевой выточки ($K_{\sigma} = 2,6$) из алюминиевого сплава АМг6Н и сплава на никелевой основе ЭП202 [24, 25] при осевом нагружении с частотами 33, 200 и 10000 Гц и коэффициентами асимметрии циклов $R = -1; 0$ и 0,5. Из приведенных в табл. 5 данных видно, что с ростом средних напряжений циклов уменьшается влияние частоты нагружения на величину пределов выносливости.

Однако значения коэффициентов чувствительности K_R к асимметрии циклов, определенных как отношение предела выносливости при данном коэффициенте асимметрии цикла к его величине при симметричных циклах, колеблются в пределах погрешности измерений напряжений (10%) при усталостных испытаниях.

Т а б л и ц а 4

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

Сплав	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	$\sigma_{-1}, \text{МПа}$	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	$\frac{185}{237}$	$\frac{0,79}{0,75}$
BT18У	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	$\frac{260}{275}$	$\frac{0,75}{0,77}$
BT3-1	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, полученные при $f = 250$ Гц, под чертой – при $f = 10$ кГц.

Т а б л и ц а 5

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

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

Выводы

1. При соблюдении идентичности условий испытаний пределы выносливости металлических материалов монотонно возрастают с повышением частоты нагружения. Это обусловлено тем, что пластическая деформация в процессе цикла изменения нагрузки на высоких частотах меньше, чем на низких, из-за малого времени пребывания материала под действием максимальной нагрузки.

2. Показано, что характеристики циклов нагружения и исходная структура материала оказывают значительное влияние на конкретный вид дефектов, возникающих в данном материале, их плотность, особенности взаимодействия. Тем не менее независимо от частоты нагружения сохраняются стадийность и локальный характер эволюции дислокационной структуры в микрообластях на фоне практически неповрежденного материала, увеличение размеров микрообластей максимальных структурных изменений по мере роста числа циклов нагружения, наличие “замороженных” в структурном отношении микрообластей. Влияние подавляющего большинства технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов на значения пределов выносливости одинаково проявляется как на низких, так и на 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 соответственно на степень накопленной за цикл пластической деформации и на значения пределов выносливости.

3. Приведено математическое описание модели, представляющее собой уравнение состояния материала для момента времени, непосредственно предшествующего началу усталостной трещины, которое учитывает частоту циклического нагружения как фактор, влияющий на скорость накопления повреждений. Экспериментальная проверка справедливости уравнения показывает, что различие в данных расчета и полученных при усталостных испытаниях находится, как правило, в области разброса экспериментальных данных и подтверждает обоснованность модели. Полученное уравнение является основой для прогнозирования характеристик сопротивления усталости, в том числе на больших базах нагружения, при различных, включая низкие, частотах по результатам высокочастотных испытаний. Проверка предложенного способа прогнозирования на большом объеме экспериментальных данных авторов и приведенных в литературных источниках показала его практическую применимость.

Резюме

Приведено результати дослідження опору утомі металевих матеріалів при частоті навантаження від одиниць герц до 10 кГц з урахуванням стану структури, температури випробувань, асиметрії циклів навантаження і наявності концентраторів напружень. Показано, що вплив переважної більшості технологічних, конструкційних і експлуатаційних чинників на значення границь витривалості однаково проявляється як на низьких, так і на високих частотах навантаження. Це свідчить про те, що основні механізми накопичення утомних пошкоджень, які характерні для цього матеріалу, зберігаються незалежно від частоти навантаження, а швидкість деформації впливає на величину неупругих деформацій і відповідно на міру накопленої за цикл пластичної деформації і значення границь витривалості. Приведено рівняння стану матеріалу, що відповідає моменту часу, який безпосередньо передує началу утомної тріщини. Рівняння враховує частоту циклічного навантаження як чинник, що впливає на швидкість накопичення пошкоджень. Експериментальна перевірка отриманого рівняння показує, що розбіжність між розрахунковими й експериментальними даними щодо опору утомі знаходиться, як правило, в межах розкиду експерименталь-

них результатів і підтверджує обґрунтованість моделі. Запропонована модель є основою для прогнозування характеристик опору утомі, в тому числі на великих базах навантаження, при різних частотах за результатами високочастотних випробувань.

1. Wang Q. Y., Berrard Y. Y., Dubarre A., et al. Gigacycle fatigue of ferrous alloys // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1999. – **22**. – P. 667–672.
2. 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.
3. Матохнюк Л. Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. – Киев: Наук. думка, 1988. – 200 с.
4. Яковлева Т. Ю. Локальная пластическая деформация и усталость металлов. – Киев: Наук. думка, 2003. – 236 с.
5. Писаренко Г. Г., Матохнюк Л. Е., Войналович О. В., Кофто Д. Г. Прогнозування характеристик опору утомі конструкційних матеріалів на великих базах навантаження // Пробл. прочности. – 2014. – № 5. – С. 48–53.
6. Матохнюк Л. Е. Влияние частоты нагружения на характеристики усталостного разрушения металлов // Механическая усталость металлов: Тр. XI Междунар. коллокви. (Киев, 13–17 мая, 1991). – Киев, 1992. – Т. 1. – С. 240–247.
7. Матохнюк Л. Е., Яковлева Т. Ю., Бялонович А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости металлов в гигацикловой области по результатам высокочастотных испытаний. Сообщ. 1. Экспериментальные результаты // Пробл. прочности. – 2012. – № 4. – С. 67–78.
8. Кузьменко В. А., Матохнюк Л. Е., Писаренко Г. Г. и др. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения. – Киев: Наук. думка, 1979. – 336 с.
9. Форрест П. Усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 352 с.
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. Взаимосвязь микромеханизмов структурной перестройки титанового сплава ВТ18У в процессе усталостного разрушения // Пробл. прочности. – 2000. – № 6. – С. 73–83.
12. Яковлева Т. Ю. Дислокационная структура титанового сплава ВТ22 в условиях циклического нагружения с различными частотами // Там же. – 2000. – № 4. – С. 33–44.
13. 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.
14. Яковлева Т. Ю., Войналович О. В., Матохнюк Л. Е. Особливості формування дислокаційної структури нікелевого сплаву за дії циклічного навантажування // Там же. – 2001. – № 4. – С. 19–25.
15. Melisova D., Weiss B., and Stickler R. The formation and stability of PSB's of CU single crystals under stress controlled cycling // Fatigue'99: Proc. of the 7th Int. Congress (June 8–12, 1999, China). – Beijing: Higher Education Press, 1999. – Vol. 1. – P. 163–172.
16. Kruml T. and Polak J. Cyclic strain localization and internal structure in aluminium-lithium alloy // Fatigue'99: Proc. of the 7th Int. Congress (June 8–12, 1999, China). – Beijing: Higher Education Press, 1999. – Vol 1. – P. 187–192.

17. Головин С. А., Пушкарь А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
18. Feng R. C., Rui Z. Y., Zhang G. T., et al. Improved method of fatigue life assessment for TiAl alloys // Пробл. прочности. – 2014. – № 2. – С. 37–44.
19. Бялонович А. В., Матохнюк Л. Е. Исследование накопления усталостных повреждений в сталях с применением Фурье-преобразования изображения структуры // Там же. – 2011. – № 6. – С. 136–145.
20. Матохнюк Л. Е., Бялонович А. В., Войналович О. В. Кількісне оцінення ступеня деградації структури сплаву АМг6 за умов циклічного навантаження // Металознавство та обробка металів. – 2011. – № 4. – С. 25–29.
21. Матохнюк Л. Е., Яковлева Т. Ю., Бялонович А. В. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости металлов в гигацикловой области по результатам высокочастотных испытаний. Сообщ. 2. Применение модели накопления усталостных повреждений // Пробл. прочности. – 2012. – № 6. – С. 67–80.
22. Маслов Л. И., Матвиенко А. Ф., Родионов Ю. В. Сравнение работоспособности титановых сплавов в условиях подбоя предельного состояния // Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. – М., 1981. – С. 143–161.
23. 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. зонал. конф. Урала. – Пермь, 1981. – С. 59.
24. Кофто Д. Г. Влияние частоты и асимметрии циклического нагружения на сопротивление усталости сплава АМг6Н // Пробл. прочности. – 1990. – № 2. – С. 101–106.
25. 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 01. 09. 2016