

УДК 539.431:669.15

К.А. Бадиков¹, А.Н. Савкин¹, А.В. Андроник¹**ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-20-26

Приведены результаты оценки роста усталостной трещины при моделировании случайной внешней нагрузки различного характера, которая реализована на сервогидравлической машине с автоматическим регулированием. Отмечено, что кинетика роста трещины зависит от характера случайного нагружения. Обсуждаются критериальные параметры, описывающие этот процесс. Проведен сравнительный анализ продолжительности роста трещины с помощью расчета по программе «цикл за циклом» по различным критериальным параметрам и полученным экспериментальным данным.

Ключевые слова: кинетика роста усталостной трещины, блочное и случайное нагружение, характер случайного воздействия.

Estimation results of fatigue crack propagation under random external loading which was applied using servo-hydraulic test machine with automatic control are represented. It is shown that crack growth kinetics depends on character of random external loading. Criterial parameters to describe crack process are discussed. Comparative analysis of crack growth durability through «cycle-by-cycle» calculation method is presented using various criterial parameters and experimental results.

Keywords: fatigue crack growth kinetics, block and random loading, random loading character.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» [Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Volgograd state technical university»] E-mail: rector@vstu.ru, prk@vstu.ru

Введение

Усталость как явление разрушения конструктивных элементов имеет место при переменном эксплуатационном нагружении конструкции [1, 2]. Усталостное разрушение обычно связано с развитием и ростом трещин, которые возникают в структурных элементах металла, имеющих локальную концентрацию напряжений, и развиваются от субмикро- и микроразмера до магистральной трещины, продвигающейся в структуре сплава [3]. Последним подходом занимается линейная и нелинейная механика разрушения, изучающая силовые и деформационные условия в материалах конструкций в связи с наличием в них дефектов типа трещин и их развития до разрушения. Многие конструкции эксплуатируются при переменном нагружении в течение большого срока службы. В этом случае микротрещины могут возникать в локальных концентраторах напряжений в результате воздействия внешних силовых факторов, окружающей среды, деградации структуры и гигацикловой усталости [4]. Поэтому для таких конструкций актуальным является назначение периодических профилактических осмотров с целью обнаружения трещин, принятия решений о продлении сроков эксплуатации и изучения кинетики развития микротрещин усталости [5–7]. Кинетика развития трещин существенно зависит от взаимодействия амплитуд переменного нагружения [8, 9]. Так, перегрузочные режимы способ-

ствуют замедлению роста трещины, недогрузочные режимы могут ее увеличивать. Режимы перегрузка-недогрузка и недогрузка-перегрузка также влияют на кинетику роста трещин. Случайное внешнее нагружение содержит все эти элементы и их совместное взаимодействие сложно анализировать, хотя такое взаимодействие и имеет место.

Целью данной работы является оценка влияния характера случайного нагружения на основании вводимых критериальных параметров на кинетику роста трещины для прогнозирования продолжительности ее роста от заданного начального размера до критического, соответствующего разрушению материала.

Материалы и методы

Испытания на трещиностойкость проводили на сервогидравлической машине Biss-Nano-25 на компактных образцах (ASTM-647) из стали Aisi-4030 (российский аналог – сталь 40XHM). Структура сплава представляет собой верхний бейнит. В ферритной матрице имеются включения легированного цементита (Fe, Cr, Mn, Mo)₃C с размерами 0,3–0,5 мкм.

Испытания образцов из стали на трещиностойкость проводили при блочном нагружении, схемы которого представлены на рис. 1, а, где а, b – однократные перегрузки и недогрузки; с, d – пятикратные перегрузки и недогрузки; e, f – трехступенчатые блоки нагружения; БСМ – большая,

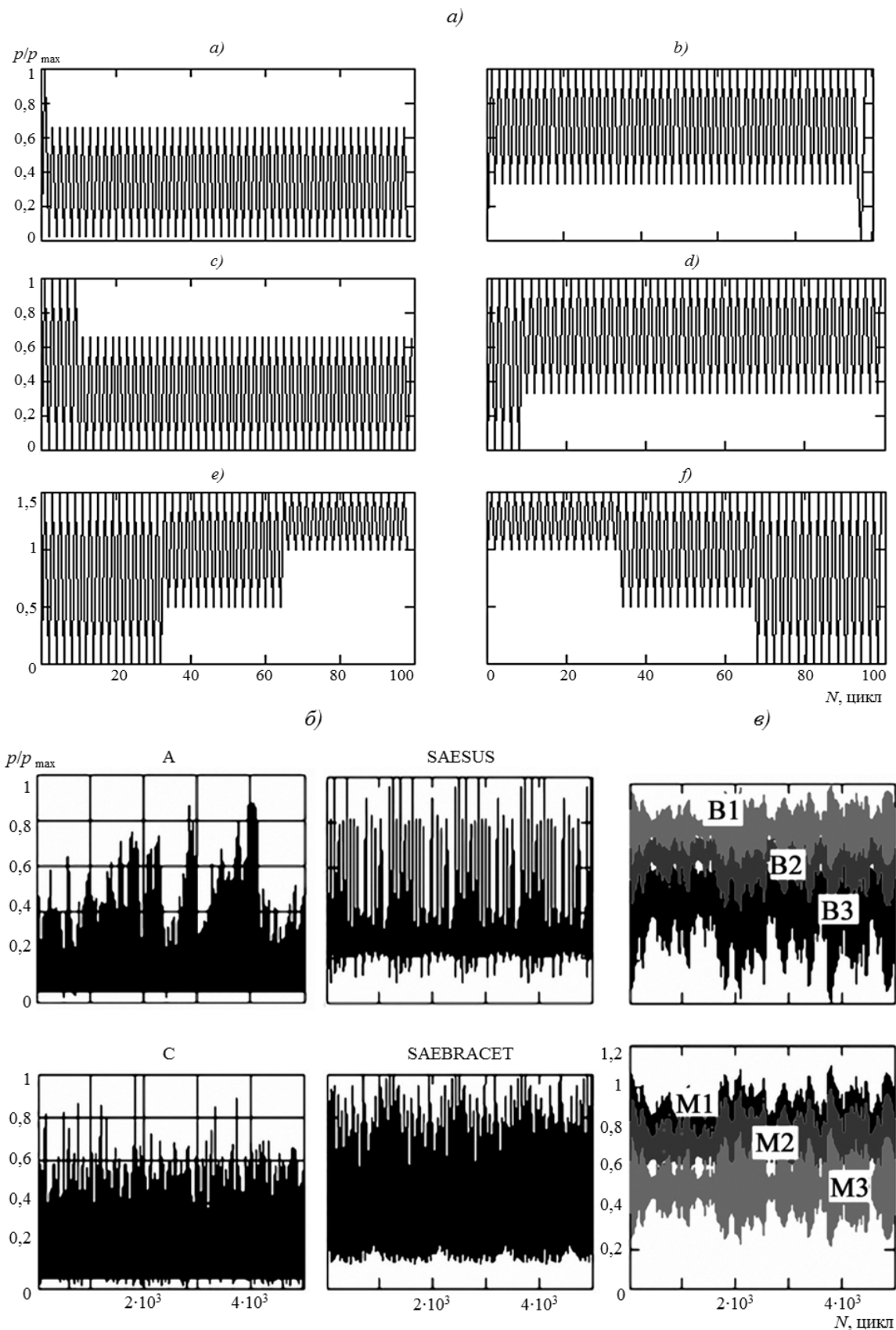


Рис. 1. Блоки (а) и спектры (б, в) случайного нагружения для исследования продолжительности роста трещин усталости (p – нагрузка)

Таблица 1

Характеристики спектров нагружения В и М

Спектры нагружения	$\sigma_{\max}/\sigma_{H\max}$	$\sigma_a/\sigma_{H\max}$	$\sigma_m/\sigma_{H\max}$	Коэффициент асимметрии цикла R
B1	1	0,2	0,8	0,6
B2	1	0,3	0,7	0,4
B3	1	0,5	0,5	0
M1	1,1	0,3	0,8	0,455
M2	1	0,3	0,7	0,4
M3	0,8	0,3	0,5	0,25

средняя, малая нагрузка; МСБ – малая, средняя, большая нагрузка; $\sigma_{\max}=200$ МПа; $\sigma_{\text{cp}}=125$ МПа; $\sigma_{\min}=63$ МПа. Блок нагружения состоял из 100 циклов, каждая ступень нагружения составляла 33 цикла нагружения. На рис. 1, б представлены спектры нагружения, а именно – спектры А и С, обобщенный спектр нагружения передней подвески легкового автомобиля (SAESUS), спектр нагружения тормозного механизма автомобиля (SAEBRACET), а на рис. 1, в – спектры нагружения с различными амплитудами и средними напряжениями цикла (табл. 1).

Смоделированные спектры формировали на основании характерных спектров различных технологических объектов (SEASUS, SAEBRACET, SAETRANS – спектр нагружения трансмиссии автомобиля), а также спектров, полученных с помощью автокорреляционного подхода (спектры А, С, В, М) [10], основанного на следующем принципе: величина вектора в двух измерениях, где каждый из компонентов независим, распределяет случайные переменные по распределению Релея, часто отвечающего различным видам реального случайного нагружения.

Спектры нагружения предварительно схематизировали с помощью метода подсчета полных циклов (метод «падающего дождя» – Rainflow) для выделения в спектре циклов нагружения, затем нормализовали по параметру $\sigma_{ai}/\sigma_{amax}$ и формировали с положительными амплитудами ($R>0$). Блок нагружения для различных спектров составлял 5000 циклов.

Таким образом сформированы спектры А и С с различными автокорреляционными коэффициентами ($\gamma_a=0,98$ и $\gamma_c=0,0075$) и коэффициентами асимметрии цикла $R>0$. Примеры используемых спектров показаны на рис. 1, б. Модельные спектры В и М получены из спектров А и С с моделированием различных коэффициентов асимметрий цикла ($R>0$) и увеличенным размахом напряжений.

Номинальное максимальное напряжение для всех спектров $\sigma_{H\max}=200$ МПа. Соотношение для амплитудного (σ_a), среднего (σ_m) и максимального (σ_{\max}) напряжений спектров В и М представлены в табл. 1. Сформированные блоки и спектры нагружения использованы для оценки кинетики разви-

тия трещин усталости исследуемой стали. На рис. 2 показаны кривые роста трещин при различных спектрах нагружения.

Спектры А и С имели одинаковое значение максимального напряжения $\sigma_{\max}=200$ МПа и коэффициент асимметрии цикла $R=0$, спектры SAE (Society of Automotive Engineers – Сообщество автомобильных инженеров) также имели максимальное значение напряжения $\sigma_{\max}=200$ МПа, но различные значения коэффициента асимметрии цикла (табл. 2). Спектры В1–В3 имели одинаковое значение максимального напряжения $\sigma_{\max}=200$ МПа, но разные значения амплитудного (σ_a) и среднего (σ_m) напряжений и различные коэффициенты асимметрии цикла (R). Спектры М1–М3 имели одинаковую амплитуду напряжений (σ_a) и разные значения σ_{amax} , σ_m и R .

Результаты

Различие спектров и блоков нагружения может зависеть от статистических параметров случайного нагружения. Мерой нерегулярности может быть параметр полноты (нерегулярности) блока программного нагружения, определяемого по ГОСТ 25.507–85.

Для случайного спектра нагружения продолжительностью V_δ циклов в блоке это выражение имеет вид:

$$V = \left\{ \frac{1}{V_\delta} \left[\sum_{i=1}^{V_\delta} \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{amax}} \right)^m \right] \right\}^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

где m – коэффициент наклона стационарной кривой в координатах $\lg\sigma_a - \lg N$; $\sigma_{ai}/\sigma_{amax}$ – нормированная i -ая амплитуда нагружения. Ступени σ_{ai} в блоках нагружения с коэффициентом асимметрии цикла $R>0$ учитывали при расчете V с приведенной амплитудой $\sigma_{aпр} = \sigma_{ai} + \psi\sigma_m$; $\psi=0,194$ по предложению Гудмана.

Представление случайного спектра нагружения по формуле (1) соответствует представлению в работах [11, 12] по приведению случайного нагружения к стационарному циклическому нагружению с эквивалентным напряжением $\sigma_{aэв} = V \cdot \sigma_{amax}$, при этом предлагается значение m принимать от 2 до 6. Таким образом, нерегулярность спектра нагружения $V=V_1$ является коэффи-

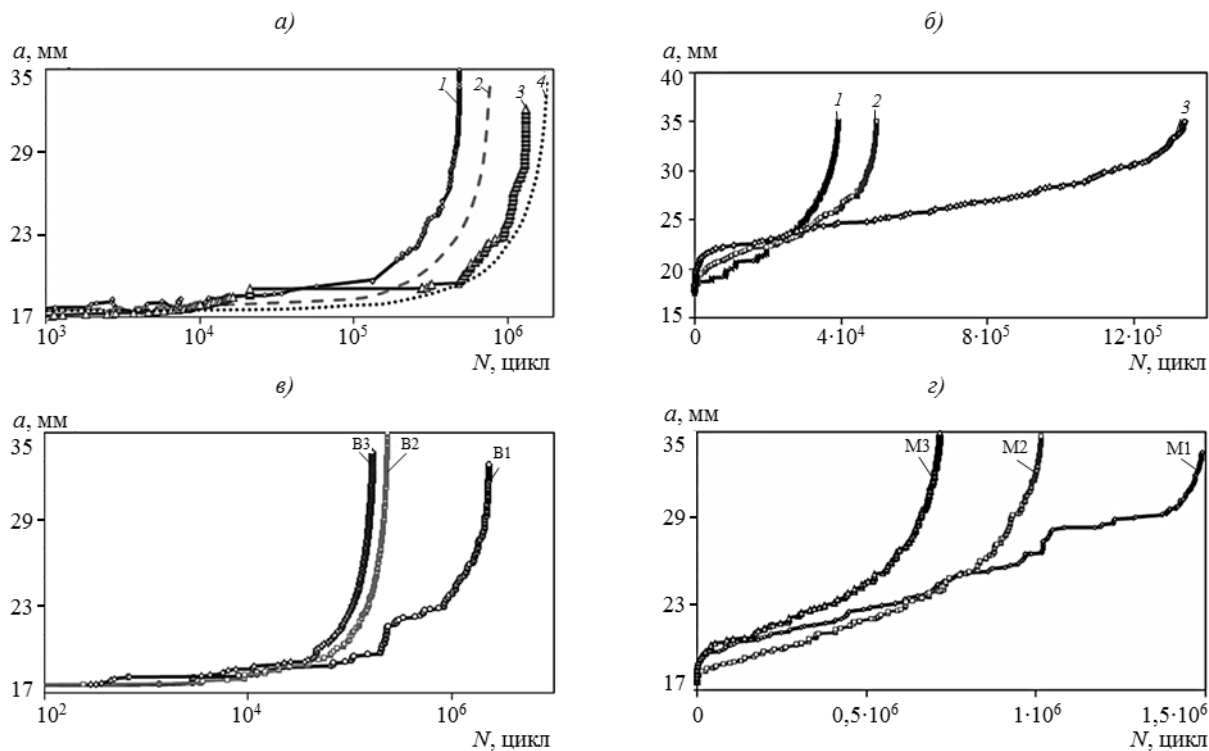


Рис. 2. Продолжительность роста усталостной трещины при нагружении спектрами:
 а – А (1, 2) и С (3, 4) (Δ , \diamond – эксперимент; - - -, расчет); б – SAESUS (1), SAETRANS (2) и SAEBRACET (3); в, г – случайные спектры нагружения В1–В3 (в) и М1–М3 (г) – с разными амплитудами напряжения и разными средними напряжениями

Таблица 2

Коэффициенты нерегулярности, эквивалентности и асимметрии сформированных блоков и спектров нагружения

Наименование блока или спектра нагружения	Расчетные значения коэффициентов			Коэффициент асимметрии цикла R
	$V (m=17,8)$	$V_1 (m=5)$	$V_2 (m=2)$	
Одна перегрузка	0,774	0,637	0,63	–
Пять перегрузок	0,846	0,676	0,65	–
Одна недогрузка	0,853	0,847	0,847	–
Пять недогрузок	0,877	0,856	0,853	–
Блочная МСБ нагрузка	0,942	0,871	0,83	–
Блочная БСМ нагрузка	0,942	0,871	0,83	–
Спектр А	0,659	0,449	0,301	0
Спектр С	0,581	0,35	0,224	0
Спектр В1	0,3	0,226	0,187	0,6
Спектр В2	0,45	0,339	0,28	0,4
Спектр В3	0,75	0,566	0,467	0
Спектр М1	0,409	0,339	0,28	0,45
Спектр М2	0,45	0,339	0,28	0,4
Спектр М3	0,562	0,339	0,28	0,25
Спектр SAESUS	0,586	0,301	0,141	0,185
Спектр SAEBRACET	0,667	0,437	0,333	0,12
Спектр SAETRANS	0,688	0,453	0,251	0,03

циентом приведения к эквивалентному стационарному нагружению с помощью напряжения $\sigma_{\text{экв}}$, позволяющему упростить проведение испытаний на усталость. Такой подход использован при оценке влияния нерегулярности на продолжительность роста усталостной трещины при случайном нагружении. В табл. 2 приведены значения коэффициента нерегулярности V по наклону стационарной кривой усталости в координатах $\lg \sigma_a - \lg N$ и эквивалентности для V_1 ($m=5$) и V_2 ($m=2$).

Кроме того, для каждого спектра подсчитаны коэффициенты асимметрии $R = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}}$, которые в дальнейшем использованы в расчете продолжительности роста трещин усталости при различных спектрах и блоках нагружения по программе «цикл за циклом».

Разработан алгоритм оценки продолжительности роста трещины усталости при случайном и блочном нагружении. Исходными данными для расчета являлись: нормализованные блоки (блочные и случайные спектры нагружения), продолжительность V_0 ; параметры зависимости Пэриса [13] – C, n ; граничные условия продолжительности роста усталостной трещины – начальное значение a_0 и критическая величина $a_{\text{кр}}$, соответствующая моменту разрушения образца; асимметрия блока или спектра нагружения – коэффициент асимметрии R ; геометрическая форма компактного образца – W, t . Оценка продолжительности роста усталостной трещины основана на формуле Пэриса для расчета долговечности от a_0 до $a_{\text{кр}}$ при стационарном нагружении:

$$NST = \int_{a_0}^{a_{\text{кр}}} \frac{1}{C \cdot \Delta K \cdot \gamma \left(\frac{a}{W} \right) (1-R)} da, \quad (2)$$

где NST – продолжительность роста трещины усталости при стационарном нагружении при напряжении σ_{max} .

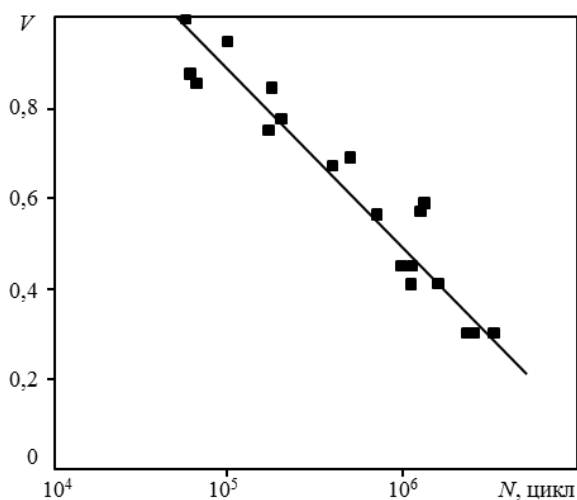


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных зависимости долговечности N роста трещины усталости от величины регулярности V блоков и спектров нагружения

Проведены расчеты продолжительности роста трещины усталости по всем блокам и спектрам нагружения для сравнения с экспериментальными данными, представленными на рис. 2. Такое сравнение проведено по характеристикам, которые даны в табл. 2, и стационарному нагружению с эквивалентным циклическим напряжением

$$\sigma_{\text{экв}} = V_1 \cdot \sigma_{\text{max}},$$

где V_1 ($m=5$) и V_2 ($m=2$).

Сравнение такого расчета с экспериментальными данными показано в табл. 3. Продолжительность роста трещины усталости в зависимости от нерегулярности спектра нагружения V представлена на рис. 3, а на рис. 2, а показаны расчетные кривые, полученные по этой программе для спектров нагружения А и С.

Видно (рис. 3), что данный критерий влияния характеристики нерегулярности V для блоков и различных спектров нагружения достаточно хорошо коррелирует с долговечностью роста трещины усталости на ее среднеамплитудном участке разрушения. Сравнительный анализ взаимосвязи продолжительности роста усталостной трещины с величинами критериальных параметров по нерегулярности спектра V и эквивалентности V_1 показан на рис. 4.

Различный наклон этих кривых по разным критериальным параметрам свидетельствует о том, что описание их может быть проведено одинаковой функцией, но с разными постоянными, определяющими их наклон. Долговечность роста трещины усталости с учетом критерия нерегулярности спектра (рис. 4, кривая 1), а также и по другим показанным в исследовании критериям влияния блочного и случайного нагружения

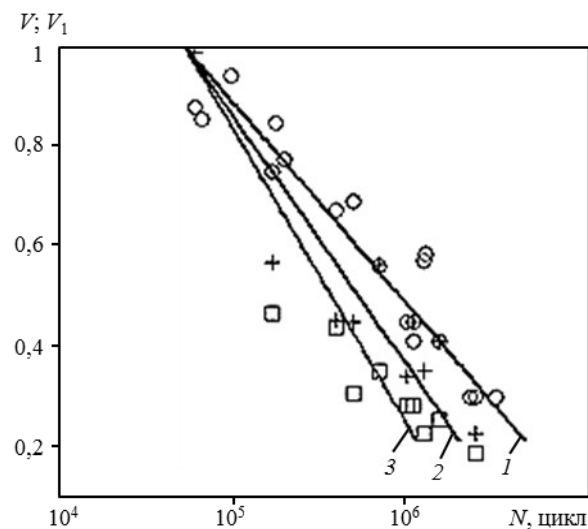


Рис. 4. Сравнение взаимоотношения продолжительности роста усталостной трещины при нестационарном нагружении от коэффициентов нерегулярности спектра V ($m=17,8$) (1) и коэффициентов эквивалентности V_1 для коэффициента наклона стационарной кривой $m=5$ (2) и $m=2$ (3)

Таблица 3

Экспериментальные $N_{\text{эксп}}$ и расчетные $N_{\text{расч}}$ значения продолжительности усталостного роста трещины при различных блочных и случайных внешних воздействиях

Наименование блока или случайного спектра нагружения	Расчетные значения $N_{\text{расч}}$ долговечности, цикл, при разных значениях коэффициентов			Экспериментальные значения $N_{\text{эксп}}$ долговечности, цикл
	$V (m=17,8)$	$V_1 (m=2)$	$V_2 (m=5)$	
Стационарное нагружение ($R=0$)	$5,9 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^4$
Одна перегрузка	$2,087 \cdot 10^5$	$1,865 \cdot 10^5$	$1,814 \cdot 10^5$	$1,982 \cdot 10^5$
Пять перегрузок	$1,777 \cdot 10^5$	$1,726 \cdot 10^5$	$1,57 \cdot 10^5$	$2,026 \cdot 10^5$
Одна недогрузка	$6,602 \cdot 10^4$	$8,976 \cdot 10^4$	$8,976 \cdot 10^4$	$9,023 \cdot 10^4$
Пять недогрузок	$6,02 \cdot 10^4$	$8,821 \cdot 10^4$	$8,75 \cdot 10^4$	$7,713 \cdot 10^4$
Блочная МСБ нагрузка	$9,802 \cdot 10^4$	$9,437 \cdot 10^4$	$8,377 \cdot 10^4$	$9,805 \cdot 10^4$
Блочная БСМ нагрузка	$9,802 \cdot 10^4$	$9,437 \cdot 10^4$	$8,377 \cdot 10^4$	$5,968 \cdot 10^4$
Спектр А	$7,7 \cdot 10^5$	$5,156 \cdot 10^6$	$6,304 \cdot 10^5$	$5,96 \cdot 10^5$
Спектр С	$1,149 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	$7,96 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^6$
Спектр В1	$1,36 \cdot 10^5$	$1,56 \cdot 10^5$	$9,38 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^5$
Спектр В2	$2,35 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^5$	$1,68 \cdot 10^5$
Спектр В3	$7,5 \cdot 10^5$	$8,3 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
Спектр М1	$6,8 \cdot 10^5$	$7,6 \cdot 10^5$	$4,74 \cdot 10^5$	$1,56 \cdot 10^6$
Спектр М2	$6,796 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
Спектр М3	$9,344 \cdot 10^5$	$1,04 \cdot 10^6$	$6,46 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$
Спектр SAESUS	$1,03 \cdot 10^6$	–	$1,156 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$
Спектр SAEBRACET	$3,598 \cdot 10^5$	$4,08 \cdot 10^5$	$3,68 \cdot 10^5$	$3,95 \cdot 10^5$
Спектр SAETRANS	$8,5 \cdot 10^5$	$1,756 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^5$	$4,95 \cdot 10^5$

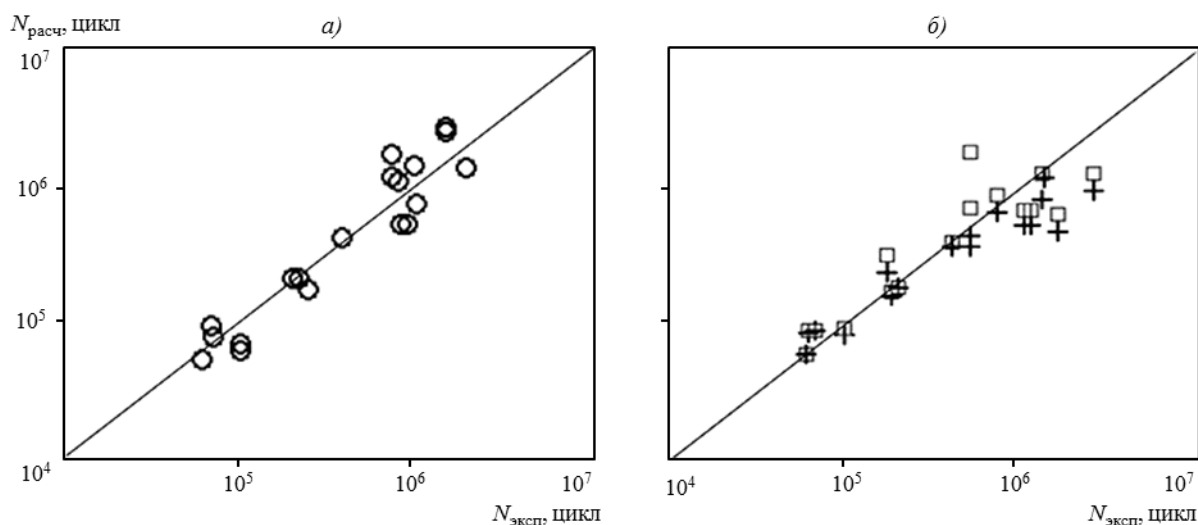


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных значений продолжительности роста усталостной трещины для различных блоков и спектров нагружения:

а – при расчете «цикл за циклом» с критериальным параметром нерегулярности спектра V с коэффициентом $m=17,8$; б – при стационарном нагружении при расчете «цикл за циклом» на основе эквивалентности стационарного и случайного нагружения V_1 с коэффициентом наклона стационарной кривой $m=5$ (+) и $m=2$ (□)

Таблица 4

Значение параметра A , входящего в уравнение (3), и коэффициента корреляции расчетных и экспериментальных данных

Показатель	Коэффициенты по различным критериальным параметрам влияния спектра нагружения на рост трещин усталости		
	V	V_1	V_2
Коэффициент A	3,83	2,6	1,8
Коэффициент корреляции расчета и эксперимента	0,85	0,9	0,7

(рис. 4, кривые 2 и 3) на рост трещины усталости можно описать уравнением:

$$NSV_i = NST \cdot 10^{[(1+A \log n)(1-V_i)]}, \quad (3)$$

где NSV_i – продолжительность роста трещины при случайном и блочном нагружении; n – коэффициент наклона кривой кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР); V_i – коэффициенты нерегулярности спектра или эквивалентности стационарного нагружения при данной нестационарной нагрузке (см. табл. 2); коэффициент A – постоянная, зависящая от выбранного критерия влияния нестационарного нагружения на продолжительность роста трещины усталости (см. табл. 3).

Сравнительный анализ соотношения экспериментальных и расчетных значений продолжительности роста усталостных трещин показан на рис. 5. Значения коэффициента корреляции расчетных и экспериментальных данных приведены в табл. 4. Видно, что наиболее близкие результаты показывают расчеты с учетом критерия влияния нерегулярности спектра V ($m=17,8$) и критерия эквивалентности V_1 ($m=5$).

Наибольший разброс экспериментальных значений от расчетных результатов наблюдается при большой продолжительности роста усталостных трещин по обоим критериям влияния.

Обсуждение и заключения

Таким образом, по результатам исследования можно сделать следующие выводы:

– параметры внешнего блочного и случайного нагружения оказывают существенное влияние на продолжительность роста усталостных трещин; не последнюю роль в этом процессе играют взаимодействие амплитуд переменного напряжения между собой и асимметрия циклического нагружения;

– для интегральной оценки такого влияния на рост усталостных трещин введены критериальные параметры нерегулярности блочного и случайного нагружений; рассмотрен подход, основанный на замене случайного воздействия на стационарное циклическое нагружение с эквивалентной амплитудой напряжения, позволяющий получить расчетную долговечность, близкую к экспериментальному значению;

– предложено аналитическое выражение, позволяющее получать приемлемые результаты оценки продолжительности роста трещин усталости; проверка соотношения проведена на большом количестве блочных и случайных нагружений различного характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия. 1975. 456 с.
2. Савкин А.Н., Багмутов В.П. Прогнозирование усталостной долговечности высоконагруженных конструкций. Волгоград: ВолГТУ. 2013. 364 с.
3. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие в 4-х т. Т. 1. /Под общ. ред. В.В. Панасюка. Киев: Наукова Думка. 1998. 486 с.
4. Терентьев В.Ф. Механизм зарождения усталостных трещин в высокопрочных сталях при гигацикловой усталости /В сб. трудов Международного коллоквиума «Механическая усталость металлов–2006». Тернополь. 2006. С. 135–140.
5. Maksimovic S. Fatigue Life Analysis of Aircraft Structural Components //Scientific-Technical Review. 2005. V. LV. №1. P. 15–21.
6. Нестеренко Г.И. Усталость и живучесть конструкций стареющих самолетов //Труды ЦАГИ. 1998. Вып. 2631. С. 67–72.
7. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости. М.: Машиностроение. 1969. 504 с.
8. Scorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under. Part I: Empirical trends //Fatigue Fract. Engineer. Matem. Struct. 1998. V. 2. P. 987–1006.
9. Scorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading – a literature review. Part II: qualitative interpretation //Fatigue Fract., Rng., Mater., Struct. 1999. V. 22. P. 905–927.
10. Kihl D.P. Stochastic fatigue concepts in welded surface scup structures. Departmental Report SSPD-90-173-25, US Navy: David Taylor Research Center, Beteshda, MD 200084-5000. 1999.
11. Agerskov H. Fatigue in steel structures under random loading //Journal of Constructional Steel Research. 2000. V. 53. P. 283–305.
12. Barsom J.M. Fatigue crack growth under variable amplitude loading in various bridge steels /In: Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads. 1976. P. 217–235.
13. Paris P.C., Erdogan F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws //Journal of Basic Engineering; Transaction, American Society of Mechanical Engineers. Series D. 1963. V. 85. P. 528–534.