

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-3-43-51

УДК (UDC) 620.191.33:620.178.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН
В СТАЛЯХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА
ПЕРЕМЕННОГО НАГРУЖЕНИЯ*****© Алексей Николаевич Савкин, Артем Валерьевич Андроник,
Кирилл Андреевич Бадиков, Александр Александрович Седов**

Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия; e-mail: geronimo855@mail.ru

Статья поступила 24 мая 2017 г.

Исследована кинетика роста усталостной трещины сталей AISI 4030, 40X, 40 при внешнем нагружении различного характера. Отмечено, что она во многом зависит от характера переменного нагружения. Получены экспериментальные данные кинетики роста усталостных трещин широкого спектра блочного и случайного нагружений исследуемых сталей и предложен подход для оценки роста трещин в зависимости от свойств материала и характера переменного внешнего воздействия. Показано, что продолжительность роста усталостной трещины на среднеамплитудном участке ее роста зависит от полноты (нерегулярности) блочного или случайного нагружения. Предложена зависимость оценки долговечности усталостной трещины от заданного начального размера до ее критической величины, соответствующей моменту разрушения материала. Для расчета использовали значение продолжительности роста усталостной трещины при отнулевом регулярном нагружении с максимальной нагрузкой, соответствующей максимальной нагрузке используемого в дальнейшем блочного или случайного нагружения, а также учитывали усталостные свойства материала, определяемые по наклону кривой выносливости при мягком симметричном нагружении. Другой подход связан с применением усредненных параметров кинетики усталостного роста трещины — наклоном кривой кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при регулярном циклическом нагружении с теми же силовыми параметрами. В обоих случаях использовали линейный принцип суммирования роста трещины без взаимодействия амплитуд. Для исследования принятых допущений проведен расчет продолжительности роста трещин по программе суммирования прироста трещины за каждый цикл нагружения (цикл за цикл) без учета взаимодействия амплитуд нагружения.

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

**STUDY OF THE DURATION OF THE FATIGUE CRACK GROWTH IN STEELS
DEPENDING ON THE NATURE OF VARIABLE LOADING****© Alexey N. Savkin, Artem V. Andronik, Kirill A. Badikov, Alexander A. Sedov**

Volgograd state technical university, Volgograd, Russian; e-mail: geronimo855@mail.ru

Submitted May 24, 2017.

Duration of growth of the fatigue crack of various steels such as AISI 4030, 40X, 40 at external excitation of various character is investigated. It should be noted that kinetics of the crack growth depends on the nature of variable loading in many respects. Experimental data of kinetics of fatigue cracks' growth of the wide spectrum of block and random loadings of investigated steels are received and an approach for cracks' growth estimate depending on material properties and the nature of variable external input is offered. It is shown that the duration of growth of the fatigue crack on the middle-amplitude segment of its growth depends on the completeness (irregularity) of block or accidental loading. It is offered the dependence of the longevity evaluation of fatigue crack durability from a given target

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-01648 А) и Гранте Президента РФ МК-943.2017.8.

size to its critical value corresponding to the moment of material destruction. For this calculation it was used the value of the fatigue crack growth duration was used at a zero regular loading with the maximum load corresponding to the maximum load of the later used block or accidental loading, also the fatigue properties of the material determined from the slope of the endurance curve under soft symmetrical loading were taken into account. The second approach is related to the application of averaged parameters of the fatigue crack growth kinetics — the slope of curve of the kinetic fatigue fracture diagram (KFFD) at regular cyclic loading with the same force parameters. The linear principle of summation of crack growth without interaction of amplitudes was used in both cases. For the study the accepted assumptions it was made a calculation of the duration growth of cracks in the program of summation the crack growth for each loading cycle (cycle-by-cycle) without taking into account the interaction of load amplitudes.

Keywords: atigue crack growth kinetics; block and random loading; character of accidental impact.

Многие конструкции эксплуатируются при переменном нагружении в течение длительного времени. Для таких конструкций проводят периодические профилактические осмотры в целях обнаружения трещин, принятия решений о продлении сроков эксплуатации и изучения кинетики развития микротрещин усталости [1 – 3]. Кинетика развития трещин может существенно зависеть от параметров внешнего нагружения и взаимодействия амплитуд переменного нагружения [4 – 6]. Так, пиковые перегрузки способствуют замедлению роста трещин, недогрузки его увеличивают. Перегрузка – недогрузка и недогрузка – перегрузка также влияют на кинетику роста трещин. Случайное внешнее нагружение содержит все эти элементы, и их взаимодействие в случайном спектре сложно анализировать, поэтому необходимо экспериментальное изучение этого явления. Исследования показывают, что перемешивание амплитуд в спектре случайного нагружения позволяет оценивать кинетику роста усталостных трещин по линейному принципу, без учета взаимодействия амплитуд напряжений.

Цель работы — оценка влияния характера блочного и случайного нагружения на кинетику роста усталостной трещины в различных сталях для прогнозирования продолжительности ее роста от заданного начального размера до критического, соответствующего разрушению материала на основании различных критериальных параметров, не учитывающих взаимодействие амплитуд напряжений.

Испытания на трещиностойкость проводили при комнатной температуре на сервогидравлической машине Biss-Nano-25 на компактных образ-

цах С(Т) (ASTM-E647) из стали AISI 4030 (российский аналог стали 40ХНМ), а также сталей 40 и 40Х. В процессе испытания записывали кинетику роста усталостных трещин и строили кинетические диаграммы усталостного разрушения. Структура стали AISI 4030 представляла собой верхний бейнит. В ферритной матрице имелись включения легированного цементита (Fe, Cr, Mn, Mo)₃C размерами 0,3 – 0,5 мкм. Стали 40Х и 40 были представлены в нормализованном состоянии. Механические характеристики исследованных сталей при статическом и регулярном симметричном циклическом нагружениях были получены экспериментально (табл. 1).

Для оценки длины трещины использовали метод податливости, заключающийся в применении датчика раскрытия трещины BISS Bi-06-201, измеряющего расстояние между кромками образца. При испытании на машине использовали программное обеспечение MTL и VAFCP с управлением по нагрузке, позволяющее автоматически обрабатывать полученные результаты.

Предварительно выращивали усталостную трещину до значения 17 мм при регулярной циклической нагрузке 8 кН ($R = 0$) для выхода на среднеамплитудный участок кинетической диаграммы усталостного разрушения.

Испытания стали AISI 4030 на трещиностойкость проводили при блочном нагружении, схемы которого представлены на рис. 1, а, где a , b — однократные перегрузки и недогрузки; c , d — пятикратные перегрузки и недогрузки; e , f — трехступенчатые блоки нагружения — БСМ — большая, средняя, малая нагрузка; МСБ — ма-

Таблица 1. Механические свойства исследуемых сталей

Марки сталей	Характеристики прочности			Характеристики выносливости		
	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Число циклов N_0	Коэффициент наклона m	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
Сталь AISI 4030	870	690	13	800 000	17,8	420
Сталь 40Х	1040	640	10	1 000 000	11,8	390
Сталь 40	580	340	18	1 200 000	14,6	200

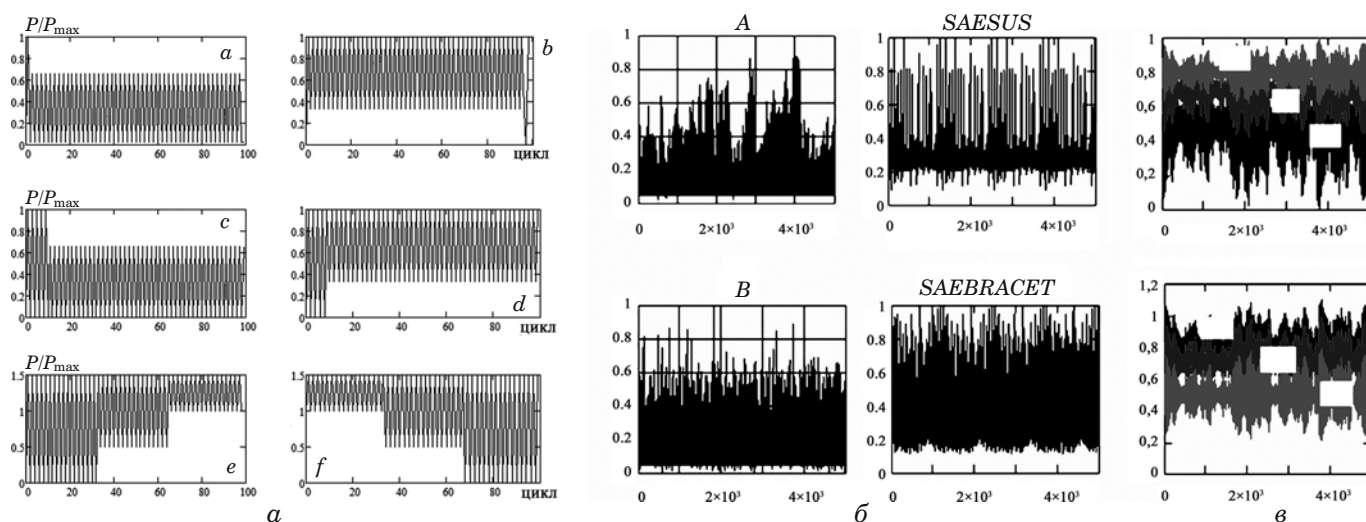


Рис. 1. Блоки и спектры нагружения для исследования продолжительности роста трещин

лая, средняя, большая нагрузка; $P_{\max} = 15$ кН; $P_m = 9,375$ кН; $P_{\min} = 4,725$ кН. Блок нагружения для такой ступенчатой нагрузки состоял из 99 циклов, каждая ступень нагружения составляла 33 цикла нагружения. На рис. 1, б приведены спектры нагружения: А; С; SAESUS; SAEBRACKET. На рис. 1, в — спектры нагружения с различными амплитудными и средними нагрузками цикла (см. табл. 2). Моделированные спектры формировались на основании характерных спектров различных технологических объектов: SEASUS — спектр нагружения передней подвески легкового автомобиля; SAEBRACKET — спектр нагружения тормозного механизма автомобиля; SAETRANS — спектр нагружения трансмиссии автомобиля. Остальные модельные спектры формировались на основании автокорреляционного подхода по распределению Релея, наиболее характерного для отказов технических объектов и конструкций, подверженных усталости и износу.

Спектры нагружения предварительно схематизировали по методу “Rainflow” для выделения в них циклов нагружения, нормализовывали по параметру $P_{ai}/P_{a\max}$ и формировали с положительными амплитудами нагрузки ($R > 0$). Блок нагружения для различных спектров составлял 5000 циклов. Так были сформированы спектры А и С с различными автокорреляционными коэффициентами ($\gamma_a = 0,98$ и $\gamma_c = 0,0075$) и коэффициентами асимметрии $R > 0$.

Спектры В и М получены из спектра А путем моделирования различных асимметрий блока $R > 0$ с увеличенным размахом нагрузки. Соотношения для амплитудного P_a , среднего P_m и максимального $P_{\max}$ значений нагрузки спектров В и М представлены в табл. 2. Стали 40Х и ста-

ли 40 испытывали при переменных нагружениях и тех же силовых параметрах, что и сталь AISI 4030.

Блоки и спектры переменного нагружения. Сформированные блоки и спектры нагружения использовали для оценки кинетики развития трещин исследуемых сталей. На рис. 2 показаны кривые роста трещин при различных спектрах нагружения для стали AISI 4030.

На рис. 3 представлены кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР), полученные при анализе роста усталостных трещин на среднеамплитудном участке при регулярном и случайных нагружениях по различным спектрам для разных сталей. Для спектральных нагружений несмотря на разброс точек, описывающих процесс продвижения усталостных трещин, среднеамплитудный участок кривой Париса можно аппроксимировать степенной зависимостью [8]

$$da/dN = C\Delta K^n. \quad (1)$$

Спектры А и С имели одинаковое значение максимальной нагрузки блока нагружения $P_{\max} = 15$ кН и асимметрию блоков нагружения

Таблица 2. Характеристики спектров нагружения В и М по параметрам переменного нагружения

Спектры нагружения	$P_{a\max}/P_{\max}$	$P_a/P_{\max}$	$P_m/P_{\max}$	R
В1	1	0,2	0,8	0,6
В2	1	0,3	0,7	0,4
В3	1	0,5	0,5	0
М1	1,1	0,3	0,8	0,455
М2	1	0,3	0,7	0,4
М3	0,8	0,3	0,5	0,25

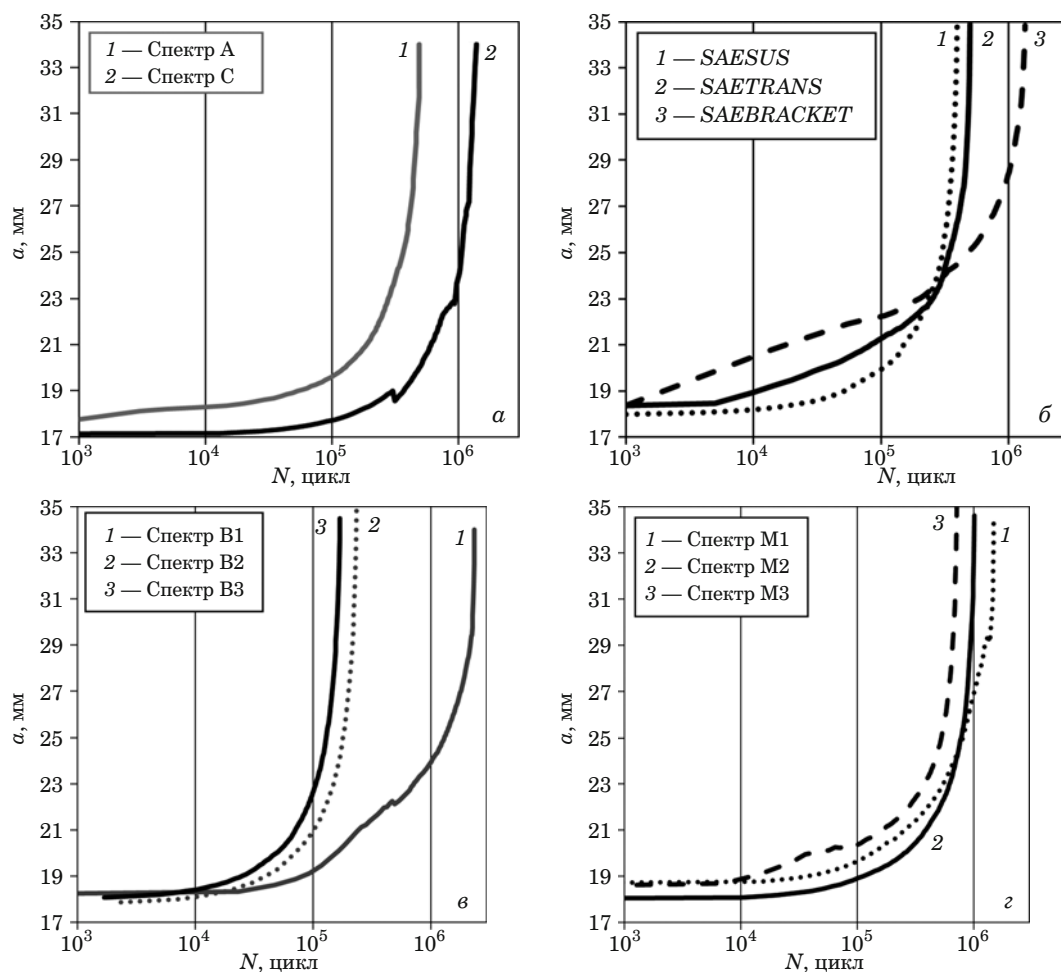


Рис. 2. Кривые роста усталостной трещины при нагружении спектрами: а — А и С; б — спектры SAESUS, SAETRANS, SAEBRACKET; в и г — случайные спектры нагружения В1 – В3 и М1 – М3 с разными амплитудными и средними значениями нагрузки

$R = 0$, спектры SAE — нагрузку $P_{\max} = 15$ кН, но различную асимметрию блока нагружения. Спектры В1 – В3 имели одинаковое значение максимальной нагрузки $P_{\max} = P_{a\max} = 15$ кН, но разные значения амплитудной P_a , средней P_m нагрузки и различные асимметрии блока нагружения R ; спектры М1 – М3 — одинаковую амплитуду нагружения P_a и разные значения $P_{a\max}$, P_m и R .

Рассмотрение КДУР для разных материалов в блоках с переменной нагрузкой различного характера позволило заключить, что расположение кривых в основном определяется полнотой спектра переменного нагружения. Чем меньше полнота спектра при постоянной максимальной нагрузке, тем скорость роста трещины ниже и продолжительность его выше. Исследование КДУР спектров М и В показало следующее. Переменность максимальной нагрузки и постоянство амплитуды нагружения в исследуемом диапазоне нагрузок свидетельствуют, что определяющим фактором для скорости роста трещины является амплитуда нагружения; КДУР спектров М близ-

ки друг к другу. Для спектра В сохраняется постоянство максимальной амплитуды нагрузки при переменном характере амплитуды нагружений. Уменьшение амплитуды нагружения способствует смещению положения КДУР в область малых скоростей роста трещины. Таким образом, скорость роста трещины для исследуемых сталей зависит от величины полноты спектра внешнего нагружения и в первую очередь — от амплитуды переменной нагрузки.

Анализ показал, что постоянные кривой Пэриса C и n в общем случае отличаются от тех значений, которые были получены при регулярном нагружении данного материала. Значения постоянных Пэриса C и n , полученные по степенной аппроксимации точек роста усталостных трещин для различных спектров нагружения, изменяются: n — от 2,8 до 4,6, а C — от $1,8 \cdot 10^{-10}$ до 10^{-13} , где ΔK представлен в размерности МПа $\cdot$ м $^{1/2}$.

Для различных КДУР наблюдается определенная взаимосвязь между постоянными C и

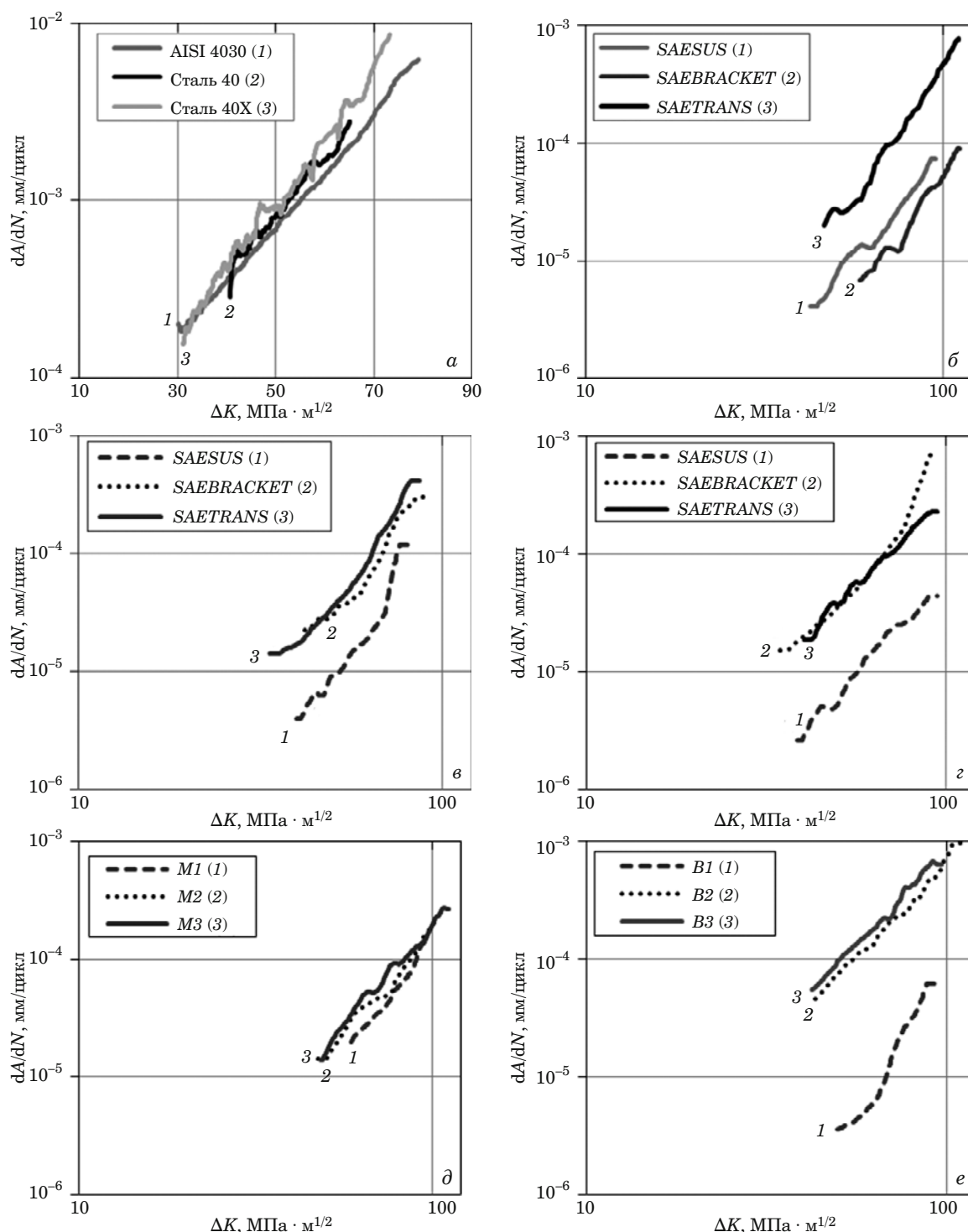


Рис. 3. Кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при переменном нагружении: *а* — регулярное нагружение исследуемых сталей; *б* — *в* — нагружение SAE спектрами стали AISI 4030 (*б*), 40X (*в*), 40 (*г*); *д*, *е* — нагружение стали AISI 4030 спектрами *М* и *В*

n , которую можно описать эмпирическим уравнением

$$n = 0,911C^{-0,054}. \quad (2)$$

Следует заметить, что на такое взаимоотношение могут оказывать влияние и асимметрия циклического нерегулярного нагружения R , и характер

его нагружения, и имеющий место статистический разброс результатов нагружения [9]. Величина достоверности аппроксимации экспериментальных данных по уравнению (2) составила 0,877.

Критерии оценки характера внешнего блочного и случайного нагружения. На продолжительность роста усталостной трещины реша-

Таблица 3. Коэффициенты нерегулярности и асимметрии для сформированных блоков и спектров нагружения

Наименование блока или спектра нагружения	$V(m1)/V(m2)$			R
	AISI 4030	Сталь 40X	Сталь 40	
1 перегрузка	0,774/0,628	—	—	0
5 перегрузок	0,846/0,656	—	—	0
1 недогрузка	0,774/0,82	—	—	0
5 недогрузок	0,846/0,82	—	—	0
Блочное МСБ	0,942/0,836	—	—	0
Блочное БСМ	0,942/0,836	—	—	0
Спектр А	0,652/0,39	—	—	0
Спектр С	0,58/0,296	0,527/0,296	0,585/0,296	0
Спектр В1	0,326/0,243	—	—	0,6
Спектр В2	0,48/0,365	—	—	0,4
Спектр В3	0,78/0,608	—	—	0
Спектр М1	0,44/0,285	—	—	0,45
Спектр М2	0,48/0,331	—	—	0,4
Спектр М3	0,593/0,391	—	—	0,25
Спектр SAESUS	0,6/0,292	0,568/0,292	0,619/0,292	0,09
Спектр SAEBRACET	0,67/0,416	0,683/0,416	0,723/0,416	0,12
Спектр SAETRANS	0,71/0,38	0,674/0,38	0,719/0,38	0,03

ющую роль оказывают величина и характер переменного усталостного нагружения. Различие между блоками и спектрами нагружения обусловлено статистическими параметрами переменного нагружения. Мерой нерегулярности может быть критерий полноты (нерегулярности) блока программного нагружения $V(m)$, определяемый по ГОСТ 25.507–85. Для блочного и случайного спектра нагружения продолжительностью V_δ циклов в блоке

$$V(m) = \left\{ \frac{1}{V_\delta} \left[\sum_{i=1}^{V_\delta} v_{ai} \left(\frac{P_{ai}}{P_{a\max}} \right)^m \right] \right\}^{1/m}, \quad (3)$$

где m — коэффициент наклона кривой выносливости при симметричном циклическом нагружении в координатах $(\lg \sigma_a - \lg N)$; $P_{ai}/P_{a\max}$ — нормированная i -я амплитуда нагружения; v_{ai} — число циклов с амплитудой P_{ai} в блочном нагружении. Однако для определения этого критерия необходимо знать не только статистические параметры внешнего переменного нагружения, но и параметры сопротивления материала усталостному разрушению в виде наклона кривой выносливости при симметричном мягком нагружении в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N$, что требует по меньшей мере построения кривой выносливости. Продолжительность роста усталостной трещины должна быть связана не только с характером внешнего переменного нагружения, но и критериальным параметром,

описывающим взаимосвязь внешнего нагружения и кинетики роста трещины. В качестве такого критерия целесообразно выбрать, например, угол наклона кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Рассмотрим возможность использования указанных критериев для оценки продолжительности роста усталостной трещины на среднеамплитудном участке кривой Пэриса.

Мера нерегулярности на основе общего сопротивления материала усталостному разрушению. Взаимосвязь этого критерия с продолжительностью роста усталостной трещины для различных сталей показана в табл. 3 и на рис. 4, а. В табл. 3 представлены расчетные значения коэффициентов нерегулярности $V(m1)$ для исследуемых сталей, блоков и спектров нагружения. Для регулярного переменного нагружения величина $V(m1)$ равна единице. Для других блоков и спектров нагружения $V(m1)$ снижается с уменьшением количества пиковых нагрузок; в нашем исследовании его значение доходит до 0,3. На значение коэффициента нерегулярности оказывает влияние угол наклона m кривой усталости при симметричном циклическом нагружении в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N$. Как видно из рис. 4, а, критерий влияния характеристики нерегулярности $V(m1)$ для блоков и различных спектров нагружения достаточно хорошо коррелирует с долговечностью роста трещины на ее среднеамплитудном участке разрушения. Наклоны этих кривых для разных

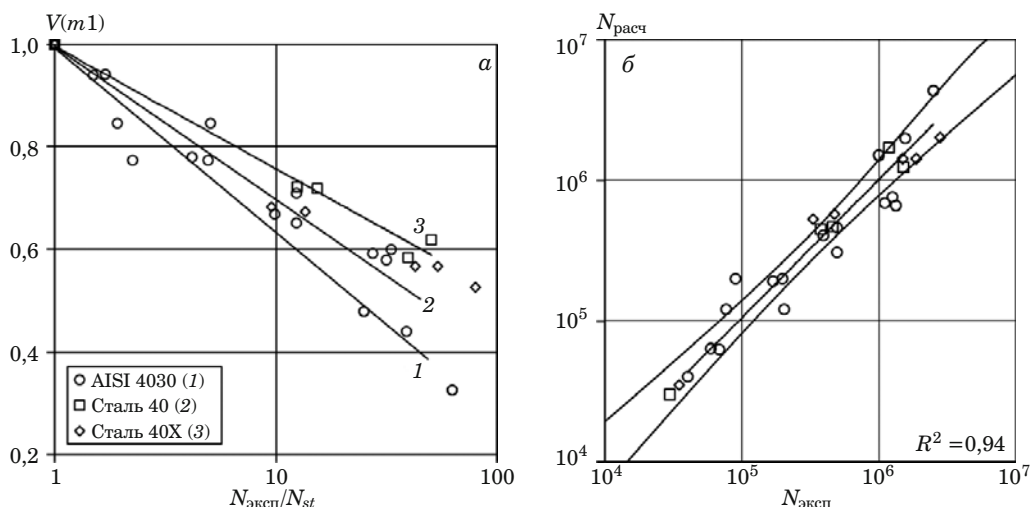


Рис. 4. Взаимосвязь относительной долговечности роста трещины по первому критерию и величины нерегулярности $V(m1)$ блоков и спектров нагружения (а), а также общая взаимосвязь расчетных и экспериментальных значений продолжительности роста усталостных трещин для исследуемых сталей со значением доверительного интервала 95 % (б)

сталей отличаются. Это свидетельствует о том, что на кинетику роста усталостной трещины могут оказывать влияние механические свойства металла, в частности пластические. Чем выше пластичность стали, тем больше энергии затрачивается на формирование пластической зоны в устье трещины, продолжительней рост трещины при одинаковых силовых воздействиях. Поэтому сталь 40 лучше сопротивляется продвижению трещины, чем стали AISI 4030 и 40X. Взаимосвязь кинетики роста трещин для сталей и характера случайного нагружения, определяемого коэффициентом $V(m1)$, можно описать одинаковой степенной функцией, но с разными постоянными, определяющими их наклон в полулогарифмических координатах $V(m1) - \lg N$ и связанными с пластическими свойствами материалов (см. табл. 1).

Мера нерегулярности на основе сопротивления материала трещиностойкости. Для оценки долговечности роста усталостной трещины использовали критерий нерегулярности $V(m2)$. Характер блочного и случайного спектра нагружения по этому критерию представляют формулой (3), при этом принимают значения $m = 2 - 6$. Для переменного нагружения продолжительностью V_8 циклов в блоке нагружения коэффициент $V(m2)$ было бы удобно представить в другом виде, приняв в уравнении (3) $m2 = n$, где n — коэффициент наклона кривой Пэриса в координатах $da/dN - \Delta K$ при регулярном нагружении. Поскольку для разных сталей и видов нагружения n могут быть различны, целесообразно принять этот коэффициент постоянным, равным его среднему значению для различных материалов ($m2 = 3,5$). Такой подход позволяет отказаться от дополнительных испытаний гладких образцов

исследуемых сталей при симметричном циклическом нагружении для определения наклона кривых выносливости m в двойных логарифмических координатах $\lg \sigma_a - \lg N$. Значения коэффициента $V(m2)$ для различных сталей и характеров переменного нагружения показаны в табл. 3 и на рис. 5, а.

Продолжительность роста усталостной трещины различных сталей при переменном нагружении. Рост трещины можно определить по формуле Пэриса при регулярном циклическом нагружении и изменении ее от a_0 до $a_{кр}$:

$$N_{st} = \int_{a_0}^{a_{кр}} \left[\frac{(1-R)^\alpha}{C \Delta K^n} \right] da, \quad (4)$$

где C, n — постоянные; ΔK — размах интенсивности напряжений в устье трещины; R — коэффициент асимметрии блока или спектра случайного нагружения; α — коэффициент влияния асимметрии блока нагружения на долговечность ($\alpha = 1$). В нашем исследовании значение N_{st} определяли экспериментально.

Размах интенсивности напряжений

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,35\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4), \quad (5)$$

где $\Delta P = 2P_a$ — размах нагрузки; B и W — толщина и ширина образца; $\alpha = a/W$ (a — длина трещины в определенный момент времени или за определенный цикл).

Предложено продолжительность роста трещины при переменном нагружении с учетом кри-

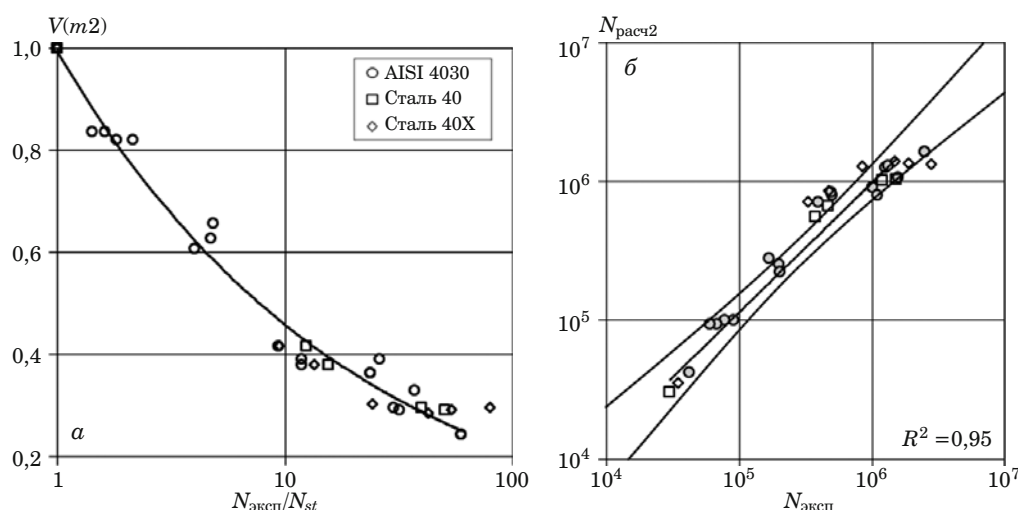


Рис. 5. Взаимосвязь относительной долговечности роста трещины по второму критерию и величины коэффициента нерегулярности $V(m2)$ блоков и спектров нагружения (а), а также расчетных $N_{расч2}$ и экспериментальных $N_{эксп}$ значений продолжительности роста усталостных трещин для исследуемых сталей со значением доверительного интервала 95 % (б)

терия (полноты) нерегулярности спектра (см. рис. 4, а, кривые 1 – 3) оценивать уравнением

$$N_{var} = N_{st} \cdot 10^{[1 + A \log(m)](1 - V)}. \quad (6)$$

Параметры кривой Пэриса (n , C) при регулярном циклическом нагружении, а также значения коэффициента m в уравнении (3) и постоянной A в уравнении (6) для различных сталей представлены в табл. 4. На основании предложенной формулы (6) и полученной во время эксперимента на трещиностойкость исследуемых сталей продолжительности роста усталостной трещины выполнено сравнение экспериментальных и расчетных значений долговечности (см. рис. 4, б и 5, б) со значением доверительного интервала, равным 95 %. Следует заметить, что оценка продолжительности роста усталостных трещин для исследуемых сталей проведена на основании линейного подхода без учета взаимодействия амплитуд нагрузок в блоке нагружения. Величина достоверности аппроксимации такой взаимосвязи по первому критерию (см. рис. 4, б) составила 0,94, а по второму (см. рис. 5, б) — 0,955.

В инженерной практике для проверки достоверности полученных экспериментальных данных продолжительности роста усталостных трещин используют программу «цикл за циклом», когда оценивают рост трещины за каждый цикл нагружения. Такое моделирование было проведено для программ нагружения исследуемых сталей. Причем расчет выполняли на основании линейного принципа суммирования роста трещин за каждый цикл нагружения без учета взаимодействия амплитуд переменного нагружения. На рис. 2, а для сравнения представлены расчетные кривые роста трещины «цикл за цикл» и экспериментальные данные, а на рис. 6 показаны результаты оценки продолжительности роста усталостных трещин на основании компьютерной программы расчета «цикл за цикл» $N_{расч3}$ по уравнению Пэриса с учетом асимметрии блочного и случайного нагружения со значением доверительного интервала, равным 95 %. Хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных показывает, что в исследуемом среднеамплитудном диапазоне кинетической диаграммы усталостного разрушения взаимное

Таблица 4. Значение параметров, входящих в уравнение (3) и (6) для различных сталей

Наименование параметра	Параметр	AISI 4030	Сталь 40X	Сталь 40
Наклон кривой Пэриса при регулярном нагружении	n	3,55	4,15	3,86
Коэффициент кривой Пэриса	C	$9 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-11}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Продолжительность роста усталостной трещины при стационарном циклическом нагружении	N_{st}	42 000	35 000	30 000
Коэффициент m уравнений (3), (6)	$m1/m2$	17,8/3,5	11,8/3,5	14,6/3,5
Коэффициент A уравнения (6)	$A1/A2$	3,6/2	4,4/2	5,5/2

Примечание. $m1$ и $A1$ — с учетом наклона кривых выносливости, $m2$ и $A2$ — с учетом наклона кривой КДУР.

влияние амплитуд случайного нагружения на рост трещины проявляется достаточно слабо.

Результаты прогнозирования долговечности роста трещины оказались аналогичными расчету по первому и второму критериям учета характера переменного нагружения. Как показывает опыт, влияние перегрузочных и недогрузочных нагружений проявляется в области долговечностей роста усталостной трещины более одного миллиона циклов и малых скоростей роста трещин. Здесь наблюдается повышенный разброс значений продолжительности роста трещин, что можно связать с влиянием взаимодействия амплитуд в спектре нагружения.

Таким образом, для интегральной оценки влияния характера внешнего циклического нагружения на рост трещин введены критериальные параметры нерегулярности блочного и случайного нагружения. Предложено аналитическое выражение для оценки продолжительности роста трещин. Проверка соотношения расчетных и экспериментальных данных выполнена на разных сталях и большом количестве блочных и случайных нагружений различного характера.

Показано, что параметры внешнего блочного и случайного нагружения оказывают существенное влияние на продолжительность роста усталостных трещин. В исследуемом среднеамплитудном диапазоне нагрузок кинетической диаграммы усталостного разрушения (кривой Пэриса) приемлемые результаты оценки долговечности роста трещин для исследуемых сталей и видов переменного нагружения различного характера получены и без учета взаимодействия амплитуд нагружений в спектре. Взаимодействие амплитуд переменных нагрузок сильнее проявляется при большой продолжительности и малых скоростях роста трещин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеренко Г. И. Усталость и живучесть конструкций стареющих самолетов / Труды ЦАГИ. 1998. Вып. 2631. С. 67 – 72.
2. Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости. — М.: Машиностроение, 1969. — 504 с.
3. Савкин А. Н., Багмутов В. П. Прогнозирование усталостной долговечности высоконагруженных конструкций: монография. — Волгоград: ВолГТУ, 2013. — 364 с.
4. Панасюк В. В. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие. Т. 4. — Киев: Наукова думка, 1988 – 1990. — 640 с.
5. Scorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under. Part I. Empirical trends / Fatigue Fract. Engineer. Matem. Struct. 1998. P. 987 – 1006.
6. Scorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading — a literature review. Part II. Qualitative interpretation / Fatigue Fract. Engineer. Mater., Struct. 1999. P. 905 – 927.

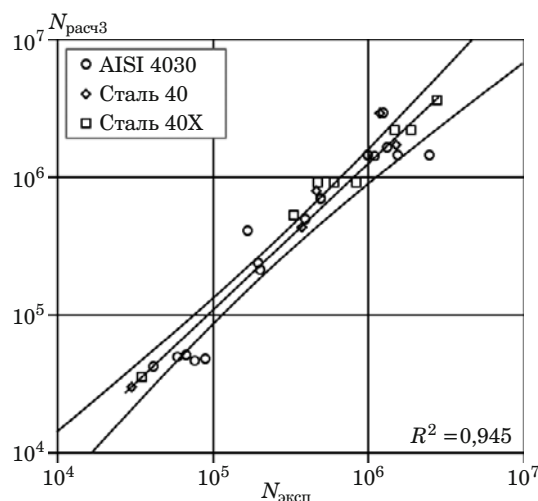


Рис. 6. Взаимосвязь расчетных «цикл за цикл» $N_{расч}$ и экспериментальных $N_{эксп}$ значений продолжительности роста усталостных трещин без учета взаимодействия амплитуд напряжений

7. Kihl D. P. Stochastic fatigue concepts in welded surface scup structures. Departamental Report SSPD-90-173-25. — US Navy: David Taylor Research Center, Beteshda. 1999.
8. 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. Vol. 85. P. 528 – 534.
9. Савкин А. Н., Андроник А. В., Корадди Р. Методика определения коэффициентов уравнения скорости роста трещины при циклическом нагружении / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 1. С. 57 – 63.

REFERENCES

1. Nesterenko G. I. Fatigue and survivability of designs of the growing old planes / Trudy TsAGI. 1998. Issue 2631. P. 67 – 72 [in Russian].
2. Kheivud R. B. Design for fatigue. — Moscow: Mashinostroyeniye, 1969. — 504 p. [in Russian].
3. Savkin A. N., Bagmutov V. P. Forecasting of fatigue endurance of the heavy loaded constructions. — Volgograd: VolGTU, 2013. — 364 p. [in Russian].
4. Panasyuk V. V. Fracture mechanics and material strength Reference book. Vol. 4. — Kiev: Naukova dumka, 1988 – 1990. — 640 p. [in Russian].
5. Scorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under. Part I. Empirical trends / Fatigue Fract. Engineer. Matem. Struct. 1998. P. 987 – 1006.
6. Scorupa M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading — a literature review. Part II. Qualitative interpretation / Fatigue Fract. Engineer. Mater. Struct. 1999. P. 905 – 927.
7. Kihl D. P. Stochastic fatigue concepts in welded surface scup structures. Departamental Report SSPD-90-173-25. — US Navy: David Taylor Research Center, Beteshda. 1999.
8. 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. Vol. 85. P. 528 – 534.
9. Savkin A. N., Andronik A. V., Koraddi R. Methods of determination of the crack growth rate equation coefficients at cyclic loading / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2016. Vol. 82. N 1. P. 57 – 63 [in Russian].