



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.07

УДК 621.01:539.431

КИНЕТИКА И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В СТАЛЯХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

А.Н. Савкин¹, Р. Сундер^{1,2}, К.А. Бадиков¹, А.А. Седов¹

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

²Bangalore Integrated Systems Solutions (BISS) Ltd., Бангалор, Индия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 июля 2018 г.
Принята: 18 сентября 2018 г.
Опубликована: 08 октября 2018 г.

Ключевые слова:

рост усталостной трещины, оценка кинетики роста трещины, прогнозирование роста трещин, регулярное и нерегулярное циклическое нагружение, модель роста трещины, коэффициент интенсивности напряжений.

АННОТАЦИЯ

Исследована кинетика роста усталостной трещины на образцах из четырёх видов сталей при регулярном и нерегулярном циклическом нагружении с различной асимметрией. Параметры нагружения были подобраны таким образом, чтобы получаемые кривые скорости роста трещины укладывались на средний участок кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР). Для испытаний применялись стандартные компактные образцы с краевой трещиной. Нагружение образцов осуществлялось на современном сервогидравлическом испытательном оборудовании, которое позволяет задать различные законы перемещения штока, записывать все параметры. Показания датчика раскрытия трещины пересчитывались в длину трещины методом податливости с помощью программного обеспечения, поставляемого с испытательным оборудованием. Известные методы прогнозирования продолжительности роста усталостной трещины при нерегулярном циклическом нагружении не способны учитывать особенности случайного нагружения. В данном исследовании предлагается новый подход для оценки продолжительности роста усталостной трещины при регулярном и нерегулярном циклическом нагружении с различными параметрами силового воздействия, учитывающий явление «закрытия» трещины и характер случайного нагружения. «Закрытие» трещины учитывается введением в расчёт эффективного коэффициента интенсивности напряжения (КИН), который в отличие от общеизвестного КИН рассчитывается с применением параметра закрытия. Характер случайного нагружения определяется коэффициентом полноты блока случайного нагружения. Проведен расчёт продолжительности роста усталостной трещины по предлагаемой модели и известному поцикловому методу расчёта. Сравнение расчётных данных с экспериментальными показало схожие результаты. При этом предлагаемая модель расчёта продолжительности роста усталостной трещины предполагает наличие небольшого числа исходных параметров и требует значительно меньших ресурсов для расчёта.

© ПНИПУ

© Савкин Алексей Николаевич – д.т.н., доц., e-mail: tfpic@vstu.ru, ORCID: [0000-0002-7276-9850](https://orcid.org/0000-0002-7276-9850).

Сундер Рамасуббу – акад. Индийской академии наук, профессор, e-mail: rs@biss.in, ORCID: [0000-0002-5339-0132](https://orcid.org/0000-0002-5339-0132).

Бадиков Кирилл Андреевич – асп., e-mail: geronimo855@mail.ru, ORCID: [0000-0002-4069-4778](https://orcid.org/0000-0002-4069-4778).

Седов Александр Александрович – к.т.н., доц., e-mail: sedov@vstu.ru, ORCID: [0000-0002-1529-7180](https://orcid.org/0000-0002-1529-7180).

Alexey N. Savkin – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: tfpic@vstu.ru, ORCID: [0000-0002-7276-9850](https://orcid.org/0000-0002-7276-9850).

Sunder Ramasubbu – Academician of the Indian Academy of Sciences, Professor, e-mail: rs@biss.in, ORCID: [0000-0002-5339-0132](https://orcid.org/0000-0002-5339-0132).

Kirill A. Badikov – PhD Student, e-mail: geronimo855@mail.ru, ORCID: [0000-0002-4069-4778](https://orcid.org/0000-0002-4069-4778).

Alexander A. Sedov – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: sedov@vstu.ru, ORCID: [0000-0002-1529-7180](https://orcid.org/0000-0002-1529-7180).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

FATIGUE CRACK GROWTH KINETIC ON STEELS UNDER VARIABLE AMPLITUDE LOADING

A.N. Savkin¹, R. Sunder^{1,2}, K.A. Badikov¹, A.A. Sedov¹

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

²Bangalore Integrated Systems Solutions (BISS) Ltd., Bangalore, India

ARTICLE INFO

Received: 27 July 2018

Accepted: 18 September 2018

Published: 08 October 2018

Keywords:

fatigue crack growth, estimation of crack growth kinetics, crack growth estimation, constant and variable amplitude cyclic loading, crack growth model, stress intensity factor.

ABSTRACT

The fatigue crack growth kinetics on samples from four types of steels under constant and variable amplitude cycling loading with different asymmetry ratio is studied. The loading parameters were chosen in such a way that the resulting fatigue crack growth rate curves fit onto the middle region of the fatigue crack growth diagram. Standard compact specimens with an edge crack were used for the tests. Loading was carried out on a modern servo-hydraulic test machine, which allows you to specify different laws of stroke movement, record all parameters. The readout of the crack opening displacement gauge was recalculated into the crack length by the compliance method using software supplied with the test equipment. The available methods aimed at predicting the fatigue crack growth life with a variable amplitude cyclic loading are not capable of taking into account the peculiarities of random loading. In this study, a new approach is proposed to estimate the fatigue crack growth life with a constant and variable amplitude loading with different loading parameters, taking into account the phenomenon of a "crack closing" and nature of random loading. The "crack closing" is taken into account by the introduction of an effective stress intensity factor (SIF) into the calculation, which, unlike the well-known SIF, is calculated using the closing factor. The nature of random loading is determined by the irregularity factor of the random loading block. Calculation of the fatigue crack growth life according to the proposed model and according to the known "cycle-by-cycle" calculation method. A comparison of the calculated data with the experimental ones showed similar results. At the same time, the proposed model aimed at calculating the fatigue crack growth supposes the presence of a small number of initial parameters and requires considerably less resources for calculation.

© PNRPU

Введение

В инженерной практике актуальной проблемой является проектирование надежных изделий, имеющих обоснованно минимальные запасы прочности, что позволяет значительно снизить металлоемкость изделия, повысить его экономичность и конкурентоспособность. Это является сложной задачей, особенно если компоненты технического объекта испытывают переменные нагрузки. Переменные нагрузки приводят к деградации прочностных характеристик – накоплению усталостных повреждений, возникновению в металле усталостных трещин и в ряде случаев к его разрушению.

Если материал изделия испытывает регулярное циклическое нагружение с постоянными во времени параметрами циклической нагрузки, то долговечность можно оценивать на основании построения кривых выносливости [1], а при исследовании кинетики развития трещин – по кинетической диаграмме усталостного разрушения (КДУР) [2, 3].

Однако если нагружение носит нерегулярный характер, полученный на основе случайных выборок эксплуатационной нагруженности [4–6], то спектр нагружения можно получить в виде временной зависимости на основании тензометрирования опасного сечения технического объекта в процессе эксплуатационного нагружения [7] или изучения динамической модели изделия [8]. При этом процесс оценки ресурса усложнится. Имея дело с переменными ампли-

тудами нагружения, нужно представлять ту важную роль, которую играет расчет циклов нагружения, по которым рассчитывается долговечность. Такие процедуры производятся на основе зарегистрированных данных нагруженности для моделирования последующей усталости при условии соответствия повреждений элемента при моделировании и оригинальном спектре нагружения. Схематизация спектра нагружения должна помочь извлечь информацию, относящуюся к процессу усталости: метод полных циклов [9] и метод «падающего дождя» (rainflow) [10].

Разнообразие режимов эксплуатации технических объектов предопределяет многообразие моделей случайных процессов, отвечающих эксплуатационной нагруженности. Известная взаимосвязь усталости металлов с особенностями внешнего переменного нагружения и окружающей среды ставит перед исследователями задачу тестирования материалов и элементов конструкций с реалистической последовательностью нагрузки. Это дает возможность оценить поведение материала при различных особенностях переменного амплитудного нагружения и определить прочность материалов и конструктивных элементов. Эти цели достигаются использованием стандартных спектров нагружения для различных технических объектов [11–13].

Для снижения стоимости и времени тестирования и моделирования роста трещины могут быть использованы сокращенные варианты реальной истории нагружения [14]. Сокращение истории нагружения включает

реальную историю и реальную последовательность нагрузки с отбрасыванием ряда пиковых значений. В этом случае история нагружения может быть приближенно упрощена в виде повторной загрузки блока нагружения с определенной последовательностью нагрузки. В данной работе оценку долговечности по росту трещины проводили с учетом характера случайного нагружения, определенного по выделенному блоку нагружения [15].

Другой подход заключается в суммировании длины трещины на основе каждого отдельного цикла (поцикло-вой расчет) с учетом [16, 17] или без учета взаимодействия амплитуд в последовательности нагрузок [18]. Если рост трещины для данного цикла не зависит от предыстории нагружения и нагрузки носят случайный характер, то в определенном приближении взаимодействием амплитуд можно пренебречь. Однако если в спектре амплитуд наблюдаются высокие перегрузки (недогрузки), то они могут ввести в нагрузку последовательность эффектов, которые существенно повлияют на долговечность роста трещины [19]. В этих случаях модели, включающие эффекты последовательности нагрузок, обеспечивают более точные оценки продолжительности роста трещин [20].

В настоящей работе, на примере четырех марок сталей, проведен анализ кинетики роста усталостных трещин при регулярном и нерегулярном циклическом нагружении с учетом воздействия на процесс роста трещины разной величины асимметрии, амплитуды и характера переменного нагружения. Предложена модель прогнозирования долговечности роста трещины на среднем участке КДУР.

1. Материал, методика исследования

Испытания на трещиностойкость проводились на сервогидравлической машине BISS Nano-25 [21] на компактных образцах типа C(T) [22]. Чертеж испытываемого типа образцов представлен на рис. 1. Образцы были изготовлены из стали AISI 4030 (русский аналог – сталь 40XНМ), стали 9Г2, а также из известных российских марок сталей 40 и 40Х, представленных в нормализованном состоянии. Механические характеристики исследуемых сталей были получены экспериментально при статическом и регулярном симметричном циклическом нагружении. Результаты этих исследований были определены с точностью 5 % и представлены в табл. 1.

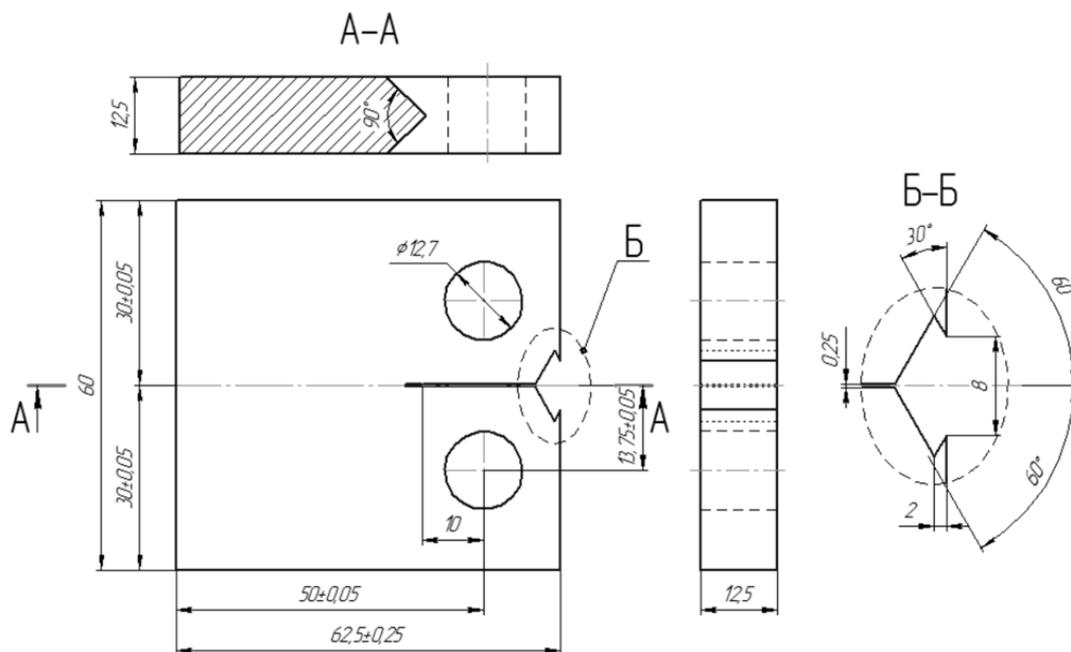


Рис. 1. Геометрия исследуемого образца типа C(T)
Fig. 1. Geometry of the studied C(T)-specimen

Таблица 1

Механические свойства исследуемых сталей
Mechanical properties of steels under study

Table 1

Марки сталей	Характеристики прочности		
	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
Сталь AISI 4030	870	690	13
Сталь 40X	1040	640	10
Сталь 40	580	340	18
Сталь 9Г2	496	303	30

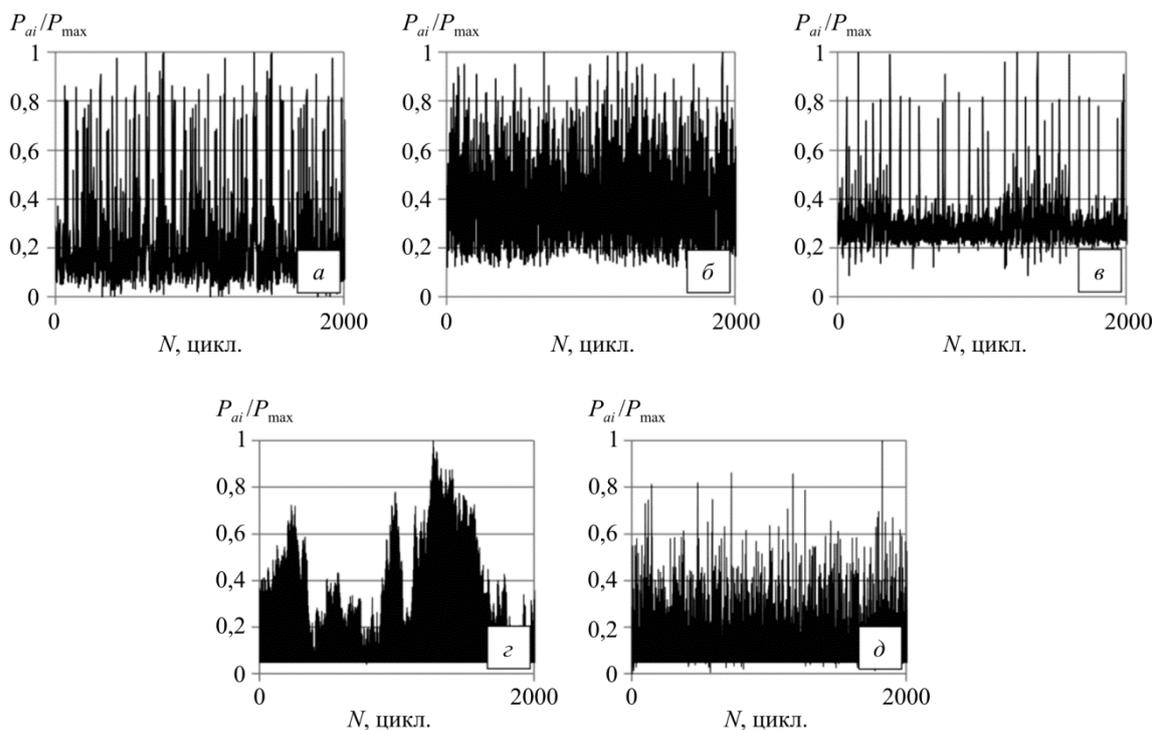


Рис. 2. Выборка из блока случайного нагружения: *a* – SAETRANS; *б* – SAEBRACKET; *в* – SAESUS; *г* – спектр А; *д* – спектр С
 Fig. 2. Sample of variable amplitude loading block: *a* – SAETRANS; *b* – SAEBRACKET; *c* – SAESUS; *d* – spectra A; *e* – spectra C

Экспериментальные исследования проводились с помощью специализированного программного обеспечения MTL-32, осуществляющего управление по нагрузке. С помощью программы VAFCP, позволяющей автоматически обрабатывать результаты испытаний, в процессе испытания записывались все параметры нагружения, и рассчитывалась длина усталостной трещины. Для измерения длины трещины использовался метод податливости [23] с применением датчика раскрытия трещины BISS Bi-06-201, измеряющего расстояние между кромками образца. Испытания проводились на воздухе при нормальных условиях окружающей среды, частота основного вида нагружения – 10 Гц.

2. Моделирование кинетики и продолжительности роста трещины при регулярном и нерегулярном нагружениях

Исследования на трещиностойкость при регулярном нагружении заключались в проведении испытаний с асимметрией нагрузки R от 0 до 0,5 и величиной максимального нагружения от 3,5 до 15 кН.

Для испытаний при нерегулярном нагружении формировались спектры квазислучайного характера на основании стандартных спектров нагружения, характерных для переменного нагружения различных технических объектов и конструктивных элементов. На рис. 2 показаны примеры нормированных спектров нагружения. Так, спектры MFS (miniFALSTAFF) и MTW (miniTWIST) были сформированы из укороченной вер-

сии стандартного спектра нагружения фюзеляжа боевого и транспортного самолета, SAESUS, SAEBRACKET, SAETRANS – укороченные спектры нагружения передней подвески, тормозного механизма и трансмиссии легкового автомобиля [24]. Спектры А и С получены с помощью автокорреляционного подхода [25, 26], основанного на принципе, что величина вектора в двух измерениях, где каждый из компонентов независим, получает случайные переменные по распределению Релея, часто отвечающего различным видам реального случайного нагружения.

Спектры А и С имели одинаковое значение максимальной нагрузки блока нагружения P_{\max} равное 15 кН, и асимметрию блоков нагружения $R = 0$, спектры SAE также имели максимальное значение нагрузки $P_{\max} = 15$ кН, но различную асимметрию блока нагружения. Для стали AISI 4030 спектры В и М были получены из спектра А с моделированием различных асимметрий блока $R > 0$ и размахов нагрузки. Спектры В₁–В₃ имели одинаковое значение максимальной нагрузки $P_{\max} = P_{a\max} = 15$ кН, но разные значения амплитудной P_a и средней P_m нагрузки, и различные асимметрии блока нагружения R . Спектры М₁–М₃ имели одинаковую амплитуду нагружения P_a и разные значения $P_{a\max}$, P_m и R .

Для сталей 40 и 40Х для всех видов спектров нерегулярного нагружения принималось одинаковое значение максимальной нагрузки блока нагружения P_{\max} , равное 15 кН, и асимметрия блоков нагружения $R = 0,1$.

Низколегированная сталь 9Г2 для изучения влияния асимметрии блока нагружения на кинетику роста и дол-

говечность трещины при регулярном нагружении испытывалась с одинаковым максимальным значением нагрузки $P_{max} = P_{amax} = 5$ кН и различной асимметрией блока нагружения. При нерегулярном нагружении различными спектрами изучалось влияние максимальной нагрузки P_{max} от 3,5 до 7 кН на продолжительность роста усталостной трещины.

Спектры нагружения предварительно нормализовались по параметру P_{ai}/P_{amax} и формировались с положи-

тельными амплитудами нагрузки ($R > 0$). Блок нагружения для различных спектров составлял 5000 циклов. Программы исследований по оценке кинетики и продолжительности роста усталостных трещины показаны в табл. 2. Расчётные и экспериментальные значения долговечностей округлялись до целых тысяч циклов.

Отличие нерегулярного нагружения от регулярного оценивается с помощью меры нерегулярности (полноты) V [27]:

Таблица 2

Программа исследований и результаты расчета трещины сталей

Table 2

Tests schedule and results of crack's life calculation

	Нагружение	P_{max} , кН	R	V	K	N_3 , млн цикл.	N_{val} , млн цикл.	N_{cr} , млн цикл.	Номер позиций на рис. 3
Сталь AISI 4030	CAL	15	0,1	1	1	0,42	–	0,027	1
	SAETRANS	15	0,1	0,381	20	0,495	0,824	0,711	2
	SAEBRACKET	15	0,1	0,401	18	0,395	0,748	0,59	3
	SAESUS	15	0,1	0,277	32	1,33	1,358	2,143	4
	Спектр M_1	16,5	0,455	0,331	25	1,56	1,048	1,151	5
	Спектр M_2	15	0,4	0,365	21	1	0,89	0,818	6
	Спектр M_3	12	0,25	0,391	19	1,1	0,786	0,644	7
	Спектр B_1	15	0,6	0,243	38	2,5	1,599	3,387	8
	Спектр B_2	15	0,4	0,365	21	1	0,89	0,818	9
	Спектр B_3	15	0	0,608	7	0,168	0,277	0,14	10
	Спектр C	15	0,1	0,296	30	1,26	1,24	1,66	11
	Спектр A	15	0,1	0,41	17	0,496	0,717	0,541	12
Сталь 9Г2	CAL	5	0	1	1	0,08	–	0,063	1
		5	0,1	1	1	0,062	–	0,073	2
		5	0,3	1	1	0,118	–	0,112	3
		5	0,5	1	1	0,31	–	0,235	4
		5	0,7	1	1	1,09	–	0,911	5
		5	0,75	1	1	1,701	–	1,553	6
	SAETRANS	3,5	0,1	0,381	20	5,3	4,815	7,258	7
		5	0	0,381	20	1,77	1,821	1,733	8
		7	0,1	0,381	20	0,553	0,616	0,627	9
	SAEBRACKET	3,5	0,1	0,401	18	3,404	4,319	6,068	10
		5	0	0,401	18	1,277	1,633	1,45	11
		7	0,1	0,401	18	0,488	0,522	0,525	12
	SAESUS	3,5	0,1	0,277	32	14,317	8,474	6,289	13
		5	0	0,277	32	5,325	3,204	5,281	14
		7	0,1	0,277	32	1,957	1,083	1,907	15
	Спектр A	7	0,1	0,391	19	0,641	0,583	0,573	16
	Спектр C	7	0,1	0,296	30	1,523	0,977	1,512	17
Сталь 40	CAL	15	0,1	1	1	0,03	–	0,02	1
	SAETRANS	15	0,1	0,381	20	0,464	0,588	0,509	2
	SAEBRACKET	15	0,1	0,401	18	0,375	0,534	0,422	3
	SAESUS	15	0,1	0,277	32	1,51	0,97	1,532	4
	Спектр C	15	0,1	0,296	29	1,19	0,877	1,187	5
Сталь 40Х	CAL	15	0,1	1	1	0,035	–	0,02	1
	SAETRANS	15	0,1	0,381	20	0,475	0,686	0,509	2
	SAEBRACKET	15	0,1	0,401	18	0,334	0,624	0,422	3
	SAESUS	15	0,1	0,277	32	1,493	1,094	1,532	4
	Спектр C	15	0,1	0,296	29	2,794	1,023	1,184	5
	MFS	15	0,1	0,302	29	0,847	1,004	1,129	6
	MTW	15	0,1	0,322	26	0,456	0,912	0,903	7

Примечание: CAL (constant amplitude loading) – регулярное циклическое нагружение; N_3 – количество циклов в экспериментальном исследовании; N_{VAL} – продолжительность роста трещины по предлагаемой модели, N_{cr} – продолжительность роста трещины по поцикловому методу.

$$V = \left[\frac{1}{v_b} \left[\sum_{i=1}^{v_b} v_{ai} \left(\frac{\Delta P_{ai}}{P_{\max}} \right)^n \right] \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

где v_b, v_a – продолжительность используемой выборки и блока переменного нагружения с нагрузкой ΔP_{ai} ; $\Delta P_{ai} / P_{\max}$ – нормированная i -я амплитуда нагружения. Для используемых спектров нагружения принималось $v_{ai} = 1$. Для регулярного нагружения значение полноты V принималось равным единице.

Для регулярных и нерегулярных нагружений процесс продвижения усталостных трещин на среднем участке КДУР (режим Пэриса) можно было представить степенной зависимостью [28]

$$da / dN = C \Delta K^n. \quad (2)$$

В настоящем исследовании для сталей 40, 40X были получены значения $C = 7 \cdot 10^{-14}$, а для AISI 4030 и 9Г2 $C = 5 \cdot 10^{-14}$ при одинаковом $n = 3,5$ в da/dN (мм/цикл) и ΔK (МПа $\sqrt{\text{мм}}$).

Для учета явления «закрытия» трещины, имеющего место при асимметриях цикла R менее 0,6–0,7 и снижающего скорость роста трещины за счет уменьшения размаха ΔK , вводится параметр U [29], описывающий закрытие трещины с асимметрией $0,1 \leq R \leq 0,7$ и определяемый по формуле

$$U = 0,55 + 0,33R + 0,12R^2. \quad (3)$$

В нашем расчете эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений в устье трещины при регулярном нагружении

$$\Delta K_{\text{эфф}} = \Delta K \cdot U \cdot V. \quad (4)$$

Здесь учитывается влияние «закрытия» трещин и асимметрии цикла нагружения на скорость роста трещины через коэффициент асимметрии R , а характер переменного нагружения через коэффициент нерегулярности V .

Таким образом, прогнозирование роста трещины при регулярном и нерегулярном нагружении можно проводить поцикловым методом по формуле

$$N_{\text{ц}} = \int_{a_0}^{a_{\text{кр}}} \frac{1}{C \Delta K_{\text{эфф}}^n} da, \quad (5)$$

где $N_{\text{ц}}$ – расчетная продолжительность роста трещин при регулярном и нерегулярном нагружениях поцикловым методом; $\Delta K_{\text{эфф}}$ – эффективный размах коэффициента интенсивности напряжений, определяемый по уравнению (4); $a_0, a_{\text{кр}}$ – начальная и критическая длина трещины.

Другой подход для оценки продолжительности роста трещины при переменном нагружении $N_{\text{p,VAR}}$ основан на предложении рассматривать кинетику роста трещины на основании ее роста при регулярном нагружении $N_{\text{э,CAL}}$ и с учетом характера переменного нагружения

через коэффициент нерегулярности V при одинаковых силовых параметрах P_{\max} и R без учета взаимодействия амплитуд в спектре нагружений [30].

$$N_{\text{VAL}} = N_{\text{э,CAL}} \cdot K, \quad (6)$$

$$K = 10^{(1+A \lg n) \cdot (1-V)}$$

где A – нормирующий параметр, равный 2–2,5 для исследуемых сталей; K – коэффициент увеличения продолжительности роста усталостной трещины при случайно циклическом нагружении по сравнению с регулярным циклическим нагружением с теми же силовыми параметрами P_{\max} и R .

3. Обсуждение результатов исследования

На рис. 3 показаны результаты испытаний сталей при регулярном и нерегулярном нагружениях для исследуемых сталей, а также совмещение кривых КДУР, полученных при регулярном и нерегулярном нагружении с представлением их через эффективный коэффициент интенсивности напряжений $\Delta K_{\text{эфф}}$.

На основании зависимостей кинетики роста трещины a - $\lg N$, полученных с использованием датчика раскрытия трещины, программный комплекс испытательной машины автоматически оценивал скорость роста da/dN и размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK в устье трещины. Эти результаты позволили построить кинетические диаграммы усталостного разрушения КДУР. Номера позиций на рис. 3 соответствуют номерам в табл. 2. Представленные исходные кривые КДУР получены после испытания и прошли операцию выпрямления. Испытания стали 9Г2 при регулярном нагружении при постоянном значении $P_{\max} = 5$ кН и различных величинах асимметрии блока нагружения $R = 0$ –0,75 (см. табл. 2, поз. 1–6) показали, что все кривые КДУР имеют тенденцию к параллельности в логарифмических координатах ($\lg(da/dN)$ – $\lg(\Delta K)$). Но с увеличением асимметрии блока нагружения R они снижаются в сторону меньших скоростей роста трещины и размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK , а следовательно, приводит к увеличению продолжительности ее роста. Это связано с уменьшением размаха интенсивности напряжений ΔK и изменением ее «закрытия» по уравнению (3).

Стали AISI 4030, 40X, 40 показали, что при одинаковых значениях $P_{\max} = 15$ кН и асимметриях $R = 0,0,1$ при нерегулярном нагружении с различными спектрами нагружения, наряду с «закрытием» трещины по уравнению (3) существенное влияние на кинетику роста трещины оказывает характеристика V – нерегулярность случайного нагружения (1). Особенно видно это по положению исходных КДУР для сталей 40, 40X, где при уменьшении V в различных спектрах они смещаются вниз, по сравнению КДУР при регулярном нагружении, сохраняя параллельность в этих координатах, что снижает продолжительность роста трещины.

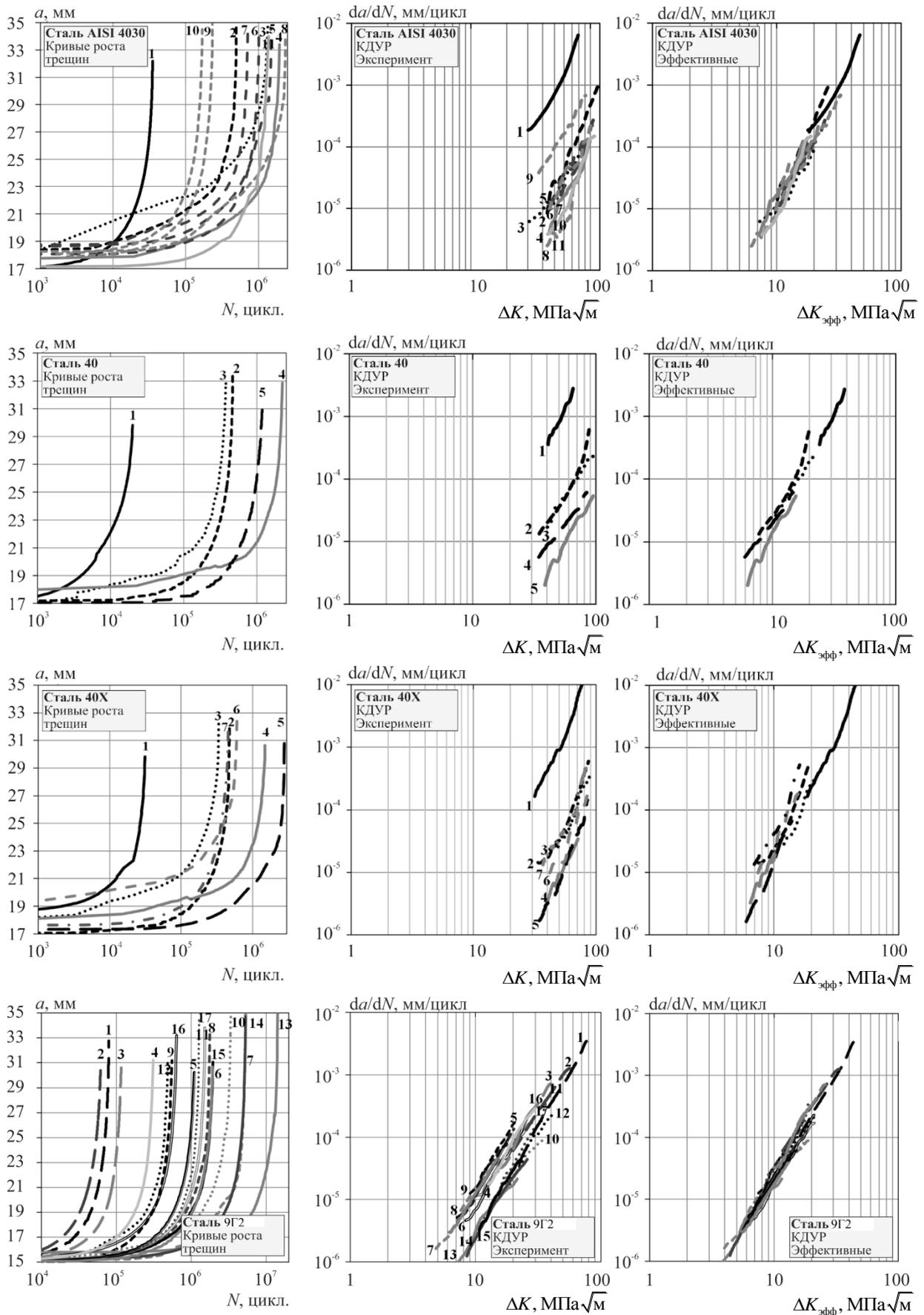


Рис. 3. Кривые роста, экспериментальные и эффективные КДУР испытаний сталей
 Fig. 3. Fatigue crack growth curves and crack growth rates with the allowance of ΔK_{eff}

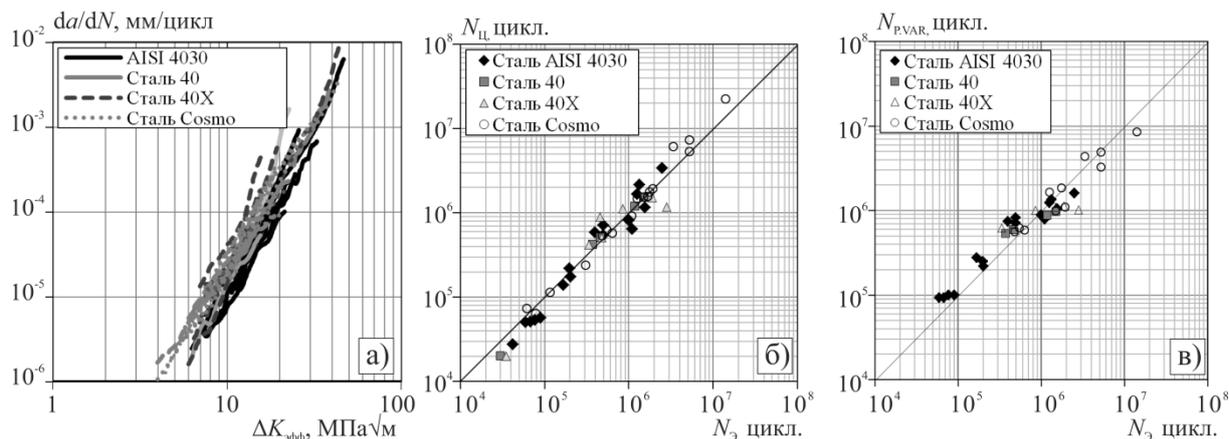


Рис. 4. Обобщенные эффективные КДУР для исследуемых сталей (а); расчет продолжительности роста трещины поцикловым методом (б) и по формуле (6); по сравнению с экспериментом (в)
 Fig. 4. Generalized fatigue crack growth rate curves with the allowance of K_{eff} (a); calculated crack growth life by "cycle-by-cycle" (b) and by formula (6); (c) is in comparison with the experimental data

Исследование кинетики стали AISI 4030 при нерегулярном нагружении спектрами В₁–В₃ с постоянным значением $P_{max} = 15$ кН и переменными значениями R (см. табл. 2, поз. 8–10) выявили увеличение долговечности роста трещины от 0,168 до 2,5 млн циклов с увеличением K от 0 до 0,6, а следовательно, с уменьшением размахов ΔK в спектре нагружения. Нерегулярное нагружение спектрами М₁–М₃ с переменным P_{max} от 16,5 до 12 кН с постоянным значением ΔK и уменьшением R от 0,455 до 0,25 (см. табл. 2, поз. 5–7) показало, что такое изменение силовых параметров приводит к снижению долговечности роста трещины и увеличению влияния «закрытия» трещины и коэффициента нерегулярности. Подробный анализ представлен в [28].

Было проведено рестроение кривых КДУР для различных сталей с учетом эффективного коэффициента интенсивности напряжений $K_{эфф}$ (4), описывающего влияние закрытия трещины U (3) и характера случайного циклического нагружения V (1). Принятый подход показал правильность принятых допущений. Кривые КДУР для исследуемых сталей при регулярном и нерегулярном нагружении различными спектрами и силовыми параметрами стремятся сгруппироваться на одни эквивалентные кривые (см. рис. 3). Была проведена попытка совместной группировки всех исследуемых сталей на одну кривую КДУР на основании введенного значения $\Delta K_{эфф}$.

На рис. 4, а показано совмещение эффективных КДУР для всех исследованных сталей, полученных при регулярном и нерегулярном нагружениях через их представление с эффективным коэффициентом интенсивности напряжений $\Delta K_{эфф}$ по формуле (4). Такой подход однозначно может описывать влияние различных силовых параметров и характер нерегулярного нагружения на интенсивность напряжений в устье растущей усталостной трещины. На рис. 4, б представлены сравнительные результаты расчета нерегулярного и регулярного нагружений поцикловым методом $N_{ц}$ по фор-

муле (5) и экспериментальных результатов $N_{э}$. На рис. 4 в показана взаимосвязь продолжительности роста трещины нерегулярного нагружения $N_{p,VAR}$ по формуле (6) от экспериментальной $N_{э}$. Результаты сравнительного расчета и отдельных опытов показаны в табл. 2. Коэффициент корреляции расчета и эксперимента $r = 0,96$.

Выводы:

1. Показан подход к оценке продолжительности роста усталостной трещины при регулярном и нерегулярном нагружении с различными параметрами силового воздействия, учитывающими «закрытие» трещины и характер случайного нагружения.

2. Проведены испытания компактных образцов при регулярном и нерегулярном циклическом нагружении на трещиностойкость при различных силовых параметрах и разном характере случайного нагружения. Показано, что использование эффективного коэффициента интенсивности напряжений, учитывающего «закрытие» трещины и нерегулярность переменного нагружения, позволяет свести кривые КДУР к эквивалентной кривой.

3. Предложена модель и проведен сравнительный анализ расчета продолжительности роста трещины по предложенному подходу с полученными экспериментальными данными. Соответствие расчета и эксперимента показало перспективность предложенного метода.

Благодарности

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

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant Nr. 17-08-01648 A) and the Russian Federation Presidential Grant МК-943.2017.8.

Библиографический список

1. Advanced materials of automobile bodies in volume production / A.N. Savkin, A.V. Andronik, A.I. Gorunov, A.A. Sedov, M.A. Sukhanov // *European Transport – Trasporti Europei* (Италия). – 2014. – Iss. 56. – No. 10. – С. 1–27.
2. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Киев: Наук. думка, 1991. – 416 с.
3. Schive J. *Fatigue of structures and materials. Second edition with CD-ROM.* – Springer, 2008. – 621 p.
4. Heuber P., Bruder T., Klätschke H. Standardized load – time histories – a contribution to durability issues under spectrum loading // *Mat-wiss. u Werkstofftech.* – 2005 – Vol. 36. – No. 11. – P. 669–677.
5. Schütz W. ASTM – STP 1006 Standardized Stress – Time Histories-An Overview // *American Society for Testing and Materials.* – Philadelphia, 1989. – P. 3–16.
6. Have A. ten European Approaches in Standard Spectrum Development / ASTM STP 1006 // *American Society for Testing and Materials.* – Philadelphia, 1989. – P. 17–35.
7. Khan A.S., Wang X. *Strain Measurements and Stress Analysis.* – Prentice Hall, 2001. – 247 p
8. Горобцов А.С. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей: моногр. / А.С. Горобцов, С.К. Карцов, А.Е. Плетнев, Ю.А. Поляков. – М.: Машиностроение, 2011. – 463 с.
9. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. – Введ. 1984.07.01. – М.: Изд-во стандартов, 2015. – 25 с.
10. Downing S.D., Socie D.F. Simple rainflow counting algorithms // *International Journal of Fatigue.* – 1982. – Vol. 4. – No. 1. – P. 76–82.
11. Heuler P., Klätschke H. Generation and use of standardised load spectra and load-time histories // *International Journal of Fatigue.* – 2005. – No. 8. – P. 974–990. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2004.09.012
12. Gurney T.R. *Fatigue of thin walled joints under complex loading.* – Abington Publishing, Cambridge, England, 1997. – 214 p.
13. Gassner E., Lipp W. ASTM-STP 671 // *American Society for Testing and Materials.* – Philadelphia, 1979. – 222 p.
14. Potter J, Watanabe R. Development of Fatigue Loading Spectra. – ASTM International, 1989. DOI: 10.1520/STP1006-EB
15. Оценка влияния полноты нагружения при перегрузочных и недогрузочных режимах в низколегированной автомобильной стали / А.Н. Савкин, А.В. Андроник, К.А. Бадиков, А.А. Седов // *Изв. ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении.* – Волгоград, 2016. – № 9 (188). – С. 79–83.
16. Palmberg B. *Probabilistic Crack Propagation Using Cycle-by-Cycle Technique.* – Berlin, Heidelberg: Springer, 1985. – P. 121–133. DOI: 10.1007/978-3-642-82419-7_13
17. Yigang Z, Shijie Z, Minggao Y. A cycle counting method considering load sequence // *International Journal of Fatigue.* Elsevier BV. – 1993. – P. 407–411. DOI: 10.1016/0142-1123(93)90487-B
18. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
19. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis / R. Sunder [et al.] // *International Journal of Fatigue.* – 2016. – Vol. 82. – Part 3. – P. 667–675.
20. Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue // *Journal of ASTM International.* – 2012. – Vol. 9. – No. 1. – 32 p.
21. BiSS. Nano Plug and Play Servo-hydraulic Testing Machine. – 2018. – URL: http://biss.in/cms/v2/index.php?option=com_content&view=article&id=252&catid=88&Itemid=323
22. ASTM E647-15e1. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
23. Neale B.K., Priest R.H. On the unloading compliance method for crack length measurement // *Engineering Fracture Mechanics.* Elsevier BV. – 1984. – P. 441–448. DOI: 10.1016/0013-7944(84)90004-3
24. Tucker L., Bussa S. The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program // *SAE Technical Paper 750038.* – 1975. DOI: 10.4271/750038
25. Kihl D.P. Stochastic fatigue concepts in welded surface scup structures. – Departmental Report SSPD-90-173-25. – US Navy: David Taylor Research Center, Beteshda, 1999.
26. Sarkani S. Feasibility of Auto- Regressive Simulation Model for Fatigue studies // *J. Structural Engineering.* – 1990. – 116(9). – P. 2481–2495.
27. ГОСТ 25.507-85. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. – Введ. 1986.07.01. – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 25 с.
28. 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.
29. Schijve J. Some Formulas for the crack opening stress level // *Engineering Fracture Mechanics.* – 1981. – № 14. – P. 461–465.
30. Оценка влияния характера нагружения и силовых параметров случайного внешнего воздействия на рост усталостной трещины в низколегированной стали / А.Н. Савкин [и др.] // *Деформация и разрушение материалов.* – 2017. – № 7. – С. 40–45.

References

1. Savkin A.N., Andronik A.V., Gorunov A.I., Sedov A.A., Sukhanov M.A. Advanced materials of automobile bodies in volume production *Advanced materials of automobile bodies in volume production. European Transport*, 2014, iss. 56, no 10, pp. 1-27.
2. Panasiuk V.V. *Mekhanika kvazikhрупкого razrusheniia materialov [Mechanics of quasibrittle fracture of materials]. Kiev, Naukova dumka*, 1991, 416 p.,
3. Schijve J. *Fatigue of structures and materials. Second edition with CD-ROM. Springer*, 2008, 621 p.
4. Heuber P., Bruder T., Klätschke H. Standardized load – time histories – a contribution to durability issues under spectrum loading. *Mat-wiss. u Werkstofftech*, 2005, 36, no. 11, pp. 669-677.
5. Schütz W. ASTM – STP 1006 Standardized Stress – Time Histories-An Overview. *American Society for Testing and Materials, Philadelphia*, 1989, pp. 3-16.
6. A. ten Have. European Approaches in Standard Spectrum Development / ASTM STP 1006. *American Society for Testing and Materials, Philadelphia*, 1989, pp. 17-35.

7. Khan A. S., Wang X. Strain Measurements and Stress Analysis. *Prentice Hall*, 2001, 247 p
8. Gorobtsov A.S., Kartsov S.K., Pletnev A.E., Poliakov Iu.A. Komp'yuternye metody postroeniia i issledovaniia matematicheskikh modelei dinamiki konstruksii avtomobilei: monografiia [Computer methods for constructing and studying of mathematical models of vehicle dynamics]. *Moscow, Mashinostroenie*, 2011, 463 p.
9. GOST 25.101-83. Strength calculation and testing. Representation of random loading of machine elements and structures and statistical evaluation of results – Intr. 1984.07.01. – Moscow, Standartinform Publ. 2015. – 25 p.
10. Downing S.D., Socie D.F. Simple rainflow counting algorithms. *International Journal of Fatigue*, 1982, vol. 4, no. 1, pp. 76-82.
11. Heuler P., Klätschke H. Generation and use of standardised load spectra and load-time histories. *International Journal of Fatigue*, 2005, no. 8, pp. 974-990. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2004.09.012.
12. Gurney T.R. Fatigue of thin walled joints under complex loading. *Abington Publishing, Cambridge, England*, 1997, 214 p.
13. Gassner E., Lipp W. ASTM-STP 671. *Philadelphia, American Society for Testing and Materials*, 1979, 222 p.
14. Potter J., Watanabe R. Development of Fatigue Loading Spectra. *ASTM International*, 1989. DOI:10.1520/STP1006-EB
15. Savkin A.N., Andronik A.V., Badikov K.A., Sedov A.A. Otsenka vliianiia polnoty nagruzheniia pri peregruzochnykh i nedogruzochnykh rezhimakh v nizkolegirovannoi avtomobil'noi stali [Estimation of the influence of load irregularity under overload and underload modes in low-alloy automotive steel]. *Volgograd, Izvestiia VolgGTU. Ser. Problemy materialovedeniia, svarki i prochnosti v mashinostroenii*, 2016, no. 9 (188), pp. 79-83
16. Palmberg B. Probabilistic Crack Propagation Using Cycle-by-Cycle Technique. *Berlin, Heidelberg. Springer*, 1985, pp. 121-133. DOI: 10.1007/978-3-642-82419-7_13.
17. Yigang Z, Shijie Z, Minggao Y. A cycle counting method considering load sequence / *International Journal of Fatigue. Elsevier BV*, 1993, pp. 407-411. DOI: 10.1016/0142-1123(93)90487-B
18. Broek D. Osnovy mekhaniki razrusheniia [Fundamentals of fracture mechanics], *Moscow Vysshiaia shkola*, 1980, 368 p.
19. Sunder R. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis. *International journal of fatigue*, 2016, vol. 82, part 3, pp. 667-675.
20. Sunder R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue. *Journal of ASTM International*, 2012, vol. 9, no. 1, 32 p.
21. BiSS. Nano Plug and Play Servo-hydraulic Testing Machine [URL], 2018. http://biss.in/cms/v2/index.php?option=com_content&view=article&id=252&catid=88&Itemid=323
22. ASTM E647-15e1. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2015.
23. Neale B.K., Priest R.H. On the unloading compliance method for crack length measurement. *Engineering Fracture Mechanics, Elsevier BV*, 1984, pp. 441-448. DOI: 10.1016/0013-7944(84)90004-3
24. Tucker L., Bussa S. The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program. *SAE Technical*, 1975, Paper 750038, DOI:10.4271/750038.
25. Kihl D.P. Stochastic fatigue concepts in welded surface scup structures. Departmental Report SSPD-90-173-25. US Navy: David Taylor Research Center, Beteshda, 1999.
26. Sarkani S. Feasibility of Auto Regressive Simulation Model for Fatigue studies. *J. Structural Engineering*, 1990, 116(9), pp. 2481-2495
27. GOST 25.507-85. Strength calculation and testing in machine building. Methods of fatigue testing under service loading. General requirements. – Intr. 1986.07.01. – Moscow, Standartinform Publ, 2005. – 25 p.
28. 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, pp. 528-534.
29. Schijve J. Some Formulas for the crack opening stress level. *Engineering Fracture Mechanics*, 14, 1981, pp. 461-465
30. Savkin A.N. Otsenka vliianiia kharaktera nagruzheniia i silovykh parametrov sluchainogo vneshnego vozdeistviia na rost ustalostnoi treshchiny v nizkolegirovannoi stali [Influence of the nature of loading and the force parameters of the random external action estimation on the fatigue crack growth in low-alloy steel]. *Deformatsiia i razrushenie materialov*, 2017, no. 7, pp. 40-45.