

УДК 621.8

doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-12-19

Методы и средства инженерного анализа усталостной трещиностойкости при гармоническом нагружении детали

С.А. Ренев

НТЦ «АПМ»

Methods and Tools for Engineering Analysis of Fatigue Fracture Toughness of a Machine Part under Harmonic Loading

S.A. Renev

Research and Development Center APM

Предложено решение задачи анализа долговечности деталей с трещинами при гармоническом нагружении в области длительной прочности. Такое внешнее воздействие, помимо основного назначения, может быть эффективно использовано в качестве базового для стохастического нагружения. Под стохастическим обычно понимают любой из возможных вариантов внешнего нагружения, включая случайный. Предложены универсальные решения для анализа долговечности деталей с трещинами при гармоническом нагружении. Разработано специализированное промышленное программное обеспечение для выполнения процедур усталостного расчета. Приведена процедура верификации этого программного обеспечения, позволяющая оценить надежность результатов расчета. Предложенные решения получены на базе прочностного анализа, основанного на использовании метода конечных элементов и реализованного в программном продукте APM Structure3D.

Ключевые слова: параметры усталостной ЛУМР, метод конечных элементов, CAE-система, методика Париса, критический КИН, деталь с трещиной

In this paper, a solution to the problem of analyzing the life cycle of machine parts with cracks under harmonic loading in the domain of high-cycle fatigue is proposed. Such an external influence, besides an independent contribution, can be effectively used as a base for stochastic loading. Stochastic loading is usually understood as any possible type of external loading, including random loading. Universal solutions for analysis of the durability of machine parts with cracks under harmonic loading are proposed. Specialized industrial software for performing fatigue calculation procedures is developed. The software verification procedure that can be used to evaluate the reliability of the results is presented. The proposed solutions are based on the strength analysis using the finite element method and implemented in the APM Structure3D software.

Keywords: fatigue parameters of LEFM, finite element method, CAE, Paris law, critical SIF, cracked part

Статическая прочность деталей, которые эксплуатируются с наличием трещин и имеют отдельные участки, работающие за пределом прочности, приведена в работах [1, 2]. У изде-

лий, подвергаемых переменным нагрузкам, очень высока вероятность образования трещин. Частным случаем таких нагрузок являются повторно-переменные, подчиняющие гармониче-

скому закону, источниками которых служат различные машины и механизмы (электродвигатели, металлообрабатывающие станки, вентиляторы, центрифуги и др.). Поскольку вращающиеся части такой техники не уравновешены, возникают повторно-переменные нагружения, приводящие к появлению трещин. Замена изделия с трещиной на этапе эксплуатации часто является экономически невыгодной операцией.

Рассмотрим одну из специальных задач линейно-упругой механики разрушения (ЛУМР) — усталостную механику разрушения, вызванную ростом трещин. Усталостное явление проявляется под действием многоциклового гармонического нагружения.

В основу получаемых решений положены зависимости ЛУМР, с помощью которых можно рассчитать число циклов до разрушения по методике Париса. Чтобы вычислить число циклов до разрушения по такой методике, применяют уравнения, зависящие от формы и размеров тела. Это ограничение не позволяет использовать методы расчета трещиностойкости в общем виде.

Малоцикловую гармоническую нагрузку рассматривать не будем вследствие широкомасштабной зоны текучести у вершины трещины (зона пластичности составляет больше 20 % длины трещины [3]).

Цель работы — разработка современного метода для вычисления числа циклов до разрушения при гармоническом нагружении детали с трещиной и его внедрение в виде программного модуля в отечественную САЕ-систему APM Structure3D.

Актуальность данной работы обусловлена следующими факторами:

- отсутствием универсального решения для вычисления числа циклов до разрушения по Парису;
- отсутствием инструментов в отечественных САЕ-системах для решения задач по усталостной трещиностойкости при повторно-переменном характере нагружения;
- зависимостью от аналогичных зарубежных САЕ-систем;
- большими экономическими и временными затратами при замене изделия с трещиной на этапе эксплуатации.

Базовые аналитические и численные зависимости, определяющие поведение трещин при условии многоциклового гармонического

нагружения. Для определения числа циклов до разрушения при многоцикловом повторно-переменном нагружении можно использовать формулу Париса в классическом виде [4]

$$\frac{dL}{dN} = C_0 (\Delta K)^n, \tag{1}$$

где L — длина трещины; N — число циклов; C_0 и n — эмпирические коэффициенты, $n = 2 \dots 7$ (чаще всего $n = 4$); ΔK — размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН), МПа·мм^{1/2}.

Для некоторых материалов эти эмпирические коэффициенты можно найти в отечественных и зарубежных источниках (например, в электронной базе данных материалов Total Materia).

Формула Париса справедлива для среднего линейного участка диаграммы усталостного разрушения, показанной на рис. 1, которая приведена в логарифмических координатах $\lg(dL/dN) - \lg K_{\max}$ (K_{\max} — максимальное значение КИН). Рост трещины возможен в том случае, если [5]

$$\Delta K > K_{th},$$

где K_{th} — пороговый коэффициент интенсивности напряжений, МПа·мм^{1/2}.

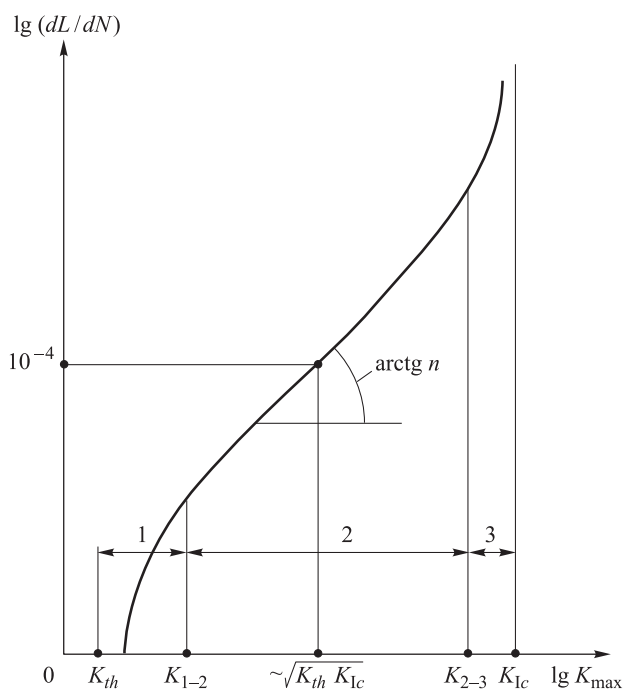


Рис. 1. Диаграмма усталостного разрушения в логарифмических координатах $\lg(dL/dN) - \lg K_{\max}$: 1 и 3 — область низких и высоких скоростей роста трещины; 2 — область корректного использования формулы Париса (K_{Ic} — критический КИН для трещины первого типа)

Для вычисления числа циклов по формуле (1) ее необходимо проинтегрировать от начальной длины трещины L_0 до критической L_c .

Критическая длина трещины определяется по формуле [6]

$$L_c = \frac{K_{fc}^2}{\sigma_{\max}^2 2\pi},$$

где K_{fc} — критический КИН при усталостном разрушении, МПа·мм^{1/2}; σ_{\max} — максимальное растягивающее напряжение в локальной системе координат (ЛСК) трещины, МПа.

Размах КИН ΔK в формуле (1) зависит от размеров и формы тела [6]. В этом случае после интегрирования формулы (1) имеем

$$N = \frac{1}{C_0 (Y \Delta \sigma \sqrt{\pi})^n} \left(\frac{1}{\frac{n}{2} - 1} \right) \left(\frac{1}{L_0^{\frac{n-1}{2}}} - \frac{1}{L_c^{\frac{n-1}{2}}} \right), \quad (2)$$

где Y — тарировочный коэффициент, зависящий от отношения длины трещины к размерам тела; $\Delta \sigma$ — размах напряжений, МПа.

В представленном виде формула (2) позволяет находить решение только для тел простых форм, полный перечень которых можно найти в справочнике Ю. Мураками [7]. Чтобы получить уравнение (2) в универсальном виде, необходимо исключить из него коэффициент Y . Для этого обратимся к классической формуле для вычисления размаха КИН [4]

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi L_0}. \quad (3)$$

После подстановки формулы (3) в выражение (2) имеем

$$N = \frac{1}{C_0 \left(\frac{\Delta K}{\sqrt{L_0}} \right)^n} \left(\frac{1}{\frac{n}{2} - 1} \right) \left(\frac{1}{L_0^{\frac{n-1}{2}}} - \frac{1}{L_c^{\frac{n-1}{2}}} \right). \quad (4)$$

Размах КИН можно определить с помощью соотношения [6]

$$\Delta K = K_{I\max} - K_{I\min}, \quad (5)$$

где $K_{I\max}$ и $K_{I\min}$ — максимальный и минимальный КИН для трещины первого типа, МПа·мм^{1/2}.

Формулу (4) применяют для расчета размаха КИН с использованием метода конечных элементов [8]. Программа APM Structure3D позволяет определять КИН для трещины первого типа K_I путем решения статической задачи.

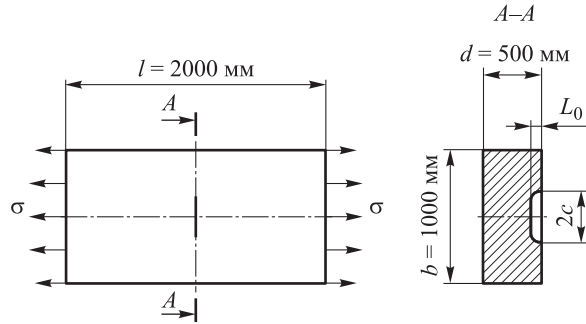


Рис. 2. Размеры пластины и расположение трещины

Задачи на усталость характеризуются таким важным параметром, как коэффициент асимметрии цикла [9]

$$R = \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}},$$

где λ_{\min} и λ_{\max} — коэффициенты минимума и максимума цикла нагружения.

Зная эти коэффициенты и КИН для трещины первого типа, можно вычислить максимальный и минимальный КИН $K_{I\min}$ по формулам

$$K_{I\max} = K_I \lambda_{\max};$$

$$K_{I\min} = K_I \lambda_{\min}.$$

В полученной универсальной формуле (4) с учетом выражения (5) число циклов N не зависит от размеров, формы тела и схем нагружения, поэтому ее можно успешно применять для вычисления N до разрушения по Парису с использованием метода конечных элементов в САЕ-системе APM Structure3D. Следует отметить, что в среде APM Structure3D была реализована процедура анализа статической и усталостной прочности деталей с трещинами.

Оценка достоверности получаемых решений (верификация). Расчет трещиностойкости при гармоническом воздействии в среде APM Structure3D. В качестве объекта для верификации выступает пластина с трещиной. Размеры пластины и расположение трещины показаны на рис. 2, где l , b и d — длина, ширина и толщина пластины соответственно; c — расширение трещины; σ — растягивающее напряжение, действующее перпендикулярно поверхности трещины.

Начальным условием являлось растягивающее напряжение $\sigma = 196$ МПа.

Согласно параметрам усталостного расчета в среде APM Structure3D, приведенным на рис. 3, $\lambda_{\max} = 1$ (при установке «Максимум» по умолчанию $\lambda_{\max} = 1$); $\lambda_{\min} = 0$.

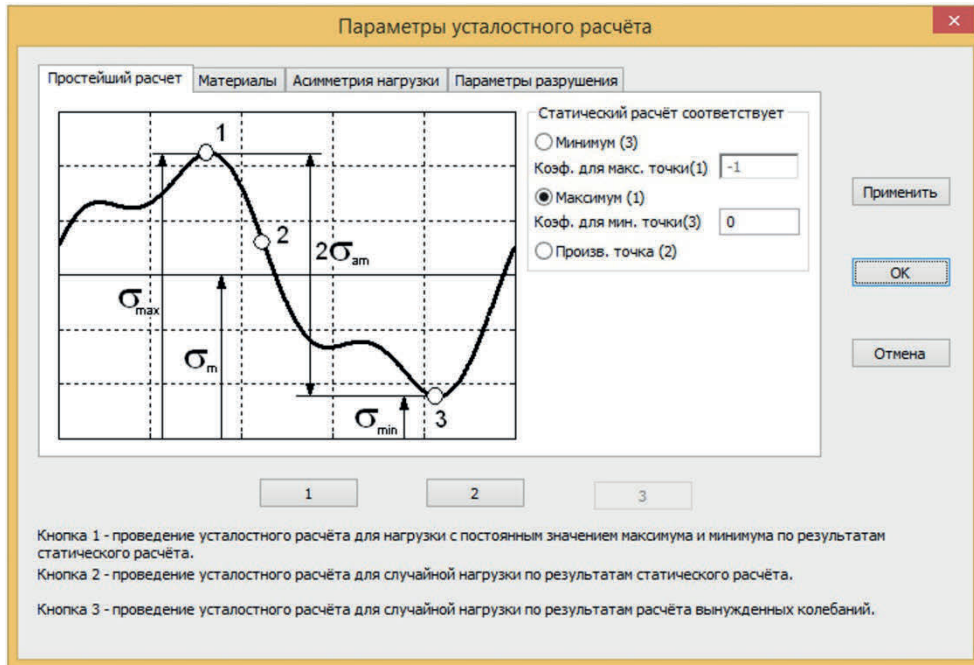


Рис. 3. Диалоговое окно «Параметры усталостного расчёта» в среде APM Structure3D

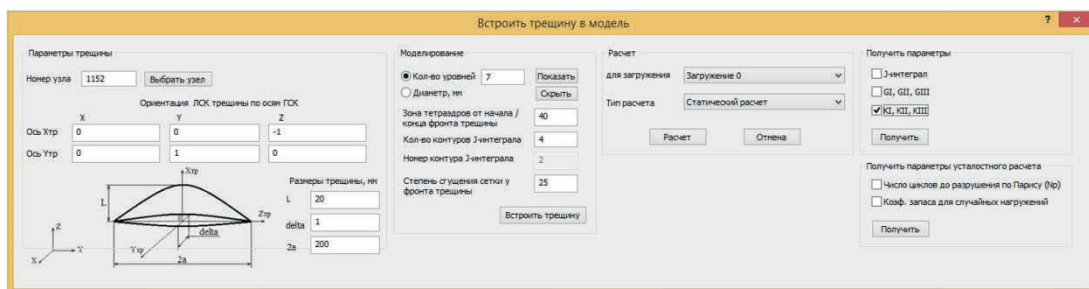


Рис. 4. Параметры встраиваемой трещины, заданные в диалоговом окне «Встроить трещину в модель»

Параметры встраиваемой трещины задаются в диалоговом окне «Встроить трещину в модель». Диалоговое окно с введенными параметрами показано на рис. 4.

Конечно-элементная модель пластины с трещиной (рис. 5) имеет следующие характеристики: число узлов и опор — 198663 и 193 соответственно; число объемных элементов: общее — 1135473, четырех-, пяти-, шести- и восьмиузловых — 1115141, 4148, 4046 и 12138 соответственно; давление на объемные элементы — 338.

В качестве материала использована сталь марки А 533-В, механические и физические свойства [10] которой приведены далее.

Механические свойства стали марки А 533-В

Предел текучести σ_t , МПа.....	343
Предел прочности σ_b , МПа.....	690
Критический КИН K_{Ic} , МПа·мм ^{1/2}	4508
Коэффициенты Париса n	2,2

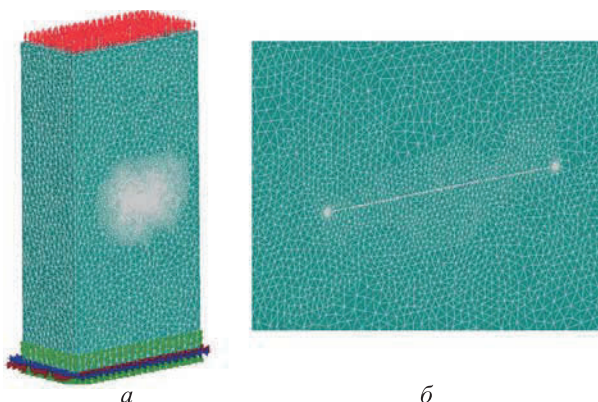


Рис. 5. Конечно-элементная модель пластины с трещиной: а — общий вид; б — область трещины

$$C_0, \frac{\text{мм/цикл}}{(\text{МПа} \cdot \text{мм}^{1/2})^n} 4,125 \cdot 10^{-11}$$

Физические свойства стали марки А 533-В

Плотность ρ , кг/мм ³	$7,8 \cdot 10^{-6}$
Модуль упругости E , ГПа	200
Коэффициент Пуассона μ	0,29
Модуль сдвига G , ГПа	80

Результаты расчета при начальной длине трещины $L_0 = 20$ мм. На рис. 6 приведен фрагмент текстового файла со значениями КИН для

трещин трех типов (K_I , K_{II} , K_{III}) вдоль ее фронта после выполнения статического расчета. Максимальное значение КИН для трещины первого типа $K_{I\max} = 1638,34$ МПа·мм^{1/2} в узле № 5882, расположенном в центре фронта.

Фрагмент текстового файла с результатами усталостного расчета показан на рис. 7. Минимальное число циклов до разрушения $N_{\min} = 75423$ соответствует узлу № 5882.

Коэффициент интенсивности напряжений (КИН), МПа/мм^{1/2}

Номер узла	KI	KII	KIII
5749	458.975	0.648825	-3.47016
5754	481.63	2.10794	-2.8732
5759	502.735	1.73575	-1.23145
5750	522.488	0.670554	-0.0713945
5751	540.928	-0.524091	0.341025
5755	556.351	-0.767939	-0.02281
...
5857	1633.33	-0.169962	0.140158
5881	1636.11	-0.597141	0.100376
5875	1637.71	-0.727934	-0.105135
5882	1638.34	-0.481779	-0.133179
5883	1637.75	-0.306526	0.0606665
5861	1635.74	-0.433713	0.212833
5868	1632.71	-0.65109	0.217145
...
6010	555.223	-0.459925	0.029687
6011	539.997	-0.429137	0.973412
6012	522.189	-1.28784	1.47825
5993	502.84	-2.44388	0.246429
5990	480.95	-2.12521	-1.19417
5987	456.291	-0.840602	-1.09473

Максимальное значение, KI_{max}: 1638.34 в узле номер: 5882
 Максимальное значение, KII_{max}: 3.2259 в узле номер: 5934
 Максимальное значение, KIII_{max}: 1.61223 в узле номер: 5972

Вывод:

Критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, KI_c: 4508 МПа/мм^{1/2}
 KI_c >= KI_{max} - эксплуатация конструкций с трещиной при заданных условиях нагружения считается безопасной

Рис. 6. Фрагмент текстового файла со значениями КИН для трещин трех типов

Число циклов до разрушения по Парису

Номер узла	Число циклов, N
5749	11745901
5754	10304852
5759	9159357
5750	8229085
5751	7464313
5755	6884380
...	...
5857	76672
5881	75978
5875	75572
5882	75423
5883	75567
5861	76031
5868	76762
...	...
6010	6920584
6011	7497556
6012	8241214
5993	9154430
5990	10342104
5987	11922521

Максимальное число циклов до разрушения, N_{max}: 1.19225e+07 в узле номер: 5987
 Минимальное число циклов до разрушения, N_{min}: 75423 в узле номер: 5882

Вывод:

Минимальное число циклов до разрушения, N_{min}: : 75423

Рис. 7. Фрагмент текстового файла со значениями числа циклов до разрушения

Коэффициент запаса по статической трещи-
нотойкости для узла № 5882

$$m = \frac{K_{Ic}}{K_{I\max}} = \frac{4508}{1638,34} = 2,75.$$

Этот коэффициент запаса является мини-
мальным из всех значений, полученных вдоль
фронта трещины. Поэтому в узле № 5882 уве-
личение трещины будет устойчивым только
первые 75423 циклов, после чего начнется ста-
дия ее неконтролируемого роста, и пластина
будет разрушена.

**Результаты расчета при начальных длинах
трещин $L_0 = 25$ мм и $L_0 = 30$ мм.** Аналогичным
образом найдены значения числа циклов до раз-
рушения для начальных длин трещин $L_0 = 25$ мм
и $L_0 = 30$ мм (табл. 1).

**Аналитическое решение задачи об усталостной
прочности.** Аналитическое решение этой задачи
приведено в работе [6]. В примере рассмотрена
пластина, идентичная показанной на рис. 2. Пла-
стина подвержена одноосному напряженному
состоянию с нанесенной на ее поверхность по-
луэллиптической трещиной, имеющей размеры
 $L/2c = 0,1$.

Пластина изготовлена из стали А 533-В про-
изводства США, имеющей следующий химиче-
ский состав (по ASTM), %: С — 0,25; Мп —
1,15...1,50; Si — 0,15...0,30; Ni — 0,40...0,70;
Мо — 0,45...0,60; Р — 1,10...1,55; S — 0,035.
Критическая длина трещины при напряжении
 $\sigma = 196$ МПа определяется выражением

$$K_{Ic}^2 = \frac{1,21\pi L_c \sigma^2}{\Phi^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma}{\sigma_T} \right)^2}, \quad (6)$$

где K_{Ic} — критический КИН для трещины пер-
вого типа, который принято считать равным
 K_{fc} [11], МПа·мм^{1/2}; Φ — полный эллиптиче-
ский интеграл второго рода, зависящий от от-
ношения $L/2c$; σ_T — предел текучести материа-
ла, соответствующий условному пределу теку-
чести $\sigma_{0,2}$, МПа.

Таблица 1

**Параметры усталостной ЛУМР при многоцикловом
повторно-переменном нагружении**

L_0 , мм	$K_{I\max}$, МПа·мм ^{1/2}	Номер узла	N_{\min}
25	1833,10	19665	66195
30	2009,49	190869	58781

Если достаточно точно известны размеры
трещины, то КИН вычисляется по формуле [6]

$$K_I = \sigma \sqrt{L_0 M}, \quad (7)$$

где M — корректирующая функция, зависящая
в первую очередь от формы поверхности тре-
щины.

Геометрический фактор M определяется со-
поставлением уравнений (6) и (7) [6]:

$$K_I = \sigma \sqrt{L_0 M} = \sigma \sqrt{L_0 \frac{1,21\pi}{Q}};$$

$$M = 1,21\pi/Q,$$

где Q — параметр трещины.

Таким образом, если пластина находится
под постоянным пульсирующим напряжением
 $\sigma = 196$ МПа, то для расчета числа циклов до
разрушения в уравнении [6]

$$N = \frac{2}{(n-2)C_0(\Delta\sigma)^n M^{\frac{n}{2}} \left(\frac{1}{L_0^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{L_c^{\frac{n-2}{2}}} \right)}$$

следует использовать значения коэффициентов
 n и C_0 , указанные в механических свойствах
стали марки А 533-В, а также рассчитанные
значения параметров [6]: $\Delta\sigma = 196$ МПа; $M =$
 $= 1,21\pi/Q$; $Q = 1,10$; $L_c = 153$ мм.

При этом уравнение кривой усталости при-
мет вид [6]

$$N = 5,68 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{L_0^{0,1}} - 0,606 \right). \quad (8)$$

Для напряжений $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_u$ (σ_0 и σ_u — мак-
симальная и минимальная амплитуды напря-
жения, МПа) циклический КИН определяется
по формуле [6]

$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{L_0 M}. \quad (9)$$

С помощью формул (8) и (9) получены сле-
дующие *результаты аналитического расчета*:

- при $L_0 = 20$ мм
 $N = 76756$; $\Delta K = 1629,51$ МПа·мм^{1/2};
- при $L_0 = 25$ мм
 $N = 67467$; $\Delta K = 1821,82$ МПа·мм^{1/2};
- при $L_0 = 30$ мм
 $N = 60029$; $\Delta K = 1995,74$ МПа·мм^{1/2}.

**Сопоставление результатов, полученных в сре-
де APM Structure3D, и рассчитанных аналити-
ческим путем.** Значения размаха КИН ΔK и
числа циклов до разрушения N , полученные
путем аналитического расчета и моделирова-
ния в среде APM Structure3D с использованием

Таблица 2

Сравнение результатов аналитического расчета и моделирования при различных значениях начальной длины трещины

L_0 , мм	ΔK , МПа·мм ^{1/2}	N	ε_N
20	$\frac{1638,34}{1629,51}$	$\frac{75423}{76756}$	0,98
25	$\frac{1833,10}{1821,82}$	$\frac{66195}{67467}$	0,98
30	$\frac{2009,49}{1995,74}$	$\frac{58781}{60029}$	0,97

Примечание. В числителе указаны значения, полученные в среде APM Structure3D, в знаменателе — рассчитанные аналитическим путем.

универсальной формулы, приведены в табл. 2. Там же указана относительная погрешность для числа циклов ε_N .

В качестве эталонных значений взяты данные, полученные аналитическим путем. При этом относительная погрешность близка к единице, что подтверждает работоспособность универсальной формулы (4).

Литература

- [1] Renev S.A., Prokopov V.S. Development of an algorithm for solving problems of fracture mechanics. *Materials Physics and Mechanics*, 2016, vol. 26, pp. 93–96.
- [2] Renev S.A., Prokopov V.S. Development of Mathematical Model for Detection of Conditional Sizes Primordial Cracks in LEM and its Implementation in Russian Cax System. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 683–688, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.078
- [3] Партон В.З. *Механика разрушения: От теории к практике*. Москва, Изд-во ЛКИ, 2010. 240 с.
- [4] Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. *Вычислительная механика разрушения*. Москва, Мир, 1986. 334 с.
- [5] Murakami Y. *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Oxford, Elsevier Ltd., 2002. 370 p.
- [6] Хеллан К. *Введение в механику разрушения*. Москва, Мир, 1988. 364 с.
- [7] *Stress intensity factors handbook*. In 2 vol. Ed. Murakami Y. Committee on Fracture Mechanics of the Society of Materials Science, Japan, 1987.
- [8] Морозов Е.М., Никишков Г.П. *Метод конечных элементов в механике разрушения*. Москва, Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 256 с.
- [9] ASTM E647–05. *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. ASTM International, 2008. 45 p.
- [10] *MatWeb*. URL: <http://www.matweb.com> (дата обращения 20 января 2019).
- [11] Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. *ANSYS в руках инженера: Механика разрушения*. Москва, ЛЕНАНД, 2014. 456 с.

Выводы

1. Полученная и используемая в САЕ-системе APM Structure3D универсальная формула для определения числа циклов до разрушения по Парису позволяет проводить расчет на усталостную трещиностойкость тел, имеющих неодинаковые размеры и формы, при различных схемах нагружения. Верификация, проведенная для трех трещин разной длины, подтверждает хорошее качество результатов расчета.

2. Применение универсальной формулы, реализованной в APM Structure3D, для анализа на усталостную трещиностойкость узлов и деталей машин, позволит инженеру-расчетчику принять решение о дальнейшей эксплуатации изделия.

3. Наличие на рынке специализированного программного обеспечения отечественной САЕ-системы для проведения расчетов на усталостную трещиностойкость делает нецелесообразным использование аналогичных зарубежных систем. Это снижает зависимость от зарубежных программных продуктов и способствует развитию программы импортозамещения.

References

- [1] Renev S.A., Prokopov V.S. Development of an algorithm for solving problems of fracture mechanics. *Materials Physics and Mechanics*, 2016, vol. 26, pp. 93–96.
- [2] Renev S.A., Prokopov V.S. Development of Mathematical Model for Detection of Conditional Sizes Primordial Cracks in LEFM and its Implementation in Russian Cax System. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 683–688, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.078
- [3] Parton V.Z. *Mekhanika razrusheniya: Ot teorii k praktike* [Fracture mechanics: From theory to practice]. Moscow, LKI publ., 2010. 240 p.
- [4] Siratori M., Miesi T., Matsusita Kh. *Vychislitel'naya mekhanika razrusheniya* [Computational Fracture Mechanics]. Moscow, Mir publ., 1986. 334 p.
- [5] Murakami Y. *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Oxford, Elsevier Ltd., 2002. 370 p.
- [6] Hellan K. *Introduction to Fracture Mechanics*. New York, McGraw-Hill, 1984. (Russ. ed.: Khellan K. *Vvedenie v mekhaniku razrusheniya*. Moscow, Mir publ., 1988. 364 p.).
- [7] *Stress intensity factors handbook*. In 2 vol. Ed. Murakami Y. Committee on Fracture Mechanics of the Society of Materials Science, Japan, 1987.
- [8] Morozov E.M., Nikishkov G.P. *Metod konechnykh ehlementov v mekhanike razrusheniya* [The finite element method in fracture mechanics]. Moscow, Knizhnyy dom "LIBRO-KOM" publ., 2010. 256 p.
- [9] *ASTM E647-05. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. ASTM International, 2008. 45 p.
- [10] *MatWeb*. Available at: <http://www.matweb.com> (accessed 20 January 2019).
- [11] Morozov E.M., Muzyemnek A.Yu., Shadskiy A.S. *ANSYS v rukakh inzhenera: Mekhanika razrusheniya* [ANSYS in the hands of an engineer: Fracture mechanics]. Moscow, LE-NAND publ., 2014. 456 p.

Статья поступила в редакцию 14.02.2019

Информация об авторе

РЕНЕВ Сергей Андреевич — программист. НТЦ «АПМ» (141070, Королев, Московская область, Российская Федерация, Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6, e-mail: chevrole59@mail.ru).

Information about the author

RENEV Sergei Andreevich — Programmer. Research and Development Center APM (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Oktyabrskii Blvd., Bldg. 14, Office 6, e-mail: chevrole59@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ренев С.А. Методы и средства инженерного анализа усталостной трещиностойкости при гармоническом нагружении детали. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 6, с. 12–19, doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-12-19

Please cite this article in English as:

Renev S.A. Methods and Tools for Engineering Analysis of Fatigue Fracture Toughness of a Machine Part under Harmonic Loading. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 6, pp. 12–19, doi: 10.18698/0536-1044-2019-6-12-19