

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКОРОСТИ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ



¹Сергей Алексеевич Соколов,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: +7 (921) 376-30-16, E-mail: sokolov_sa@spbstu.ru.



²Алексей Андреевич Грачев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (905) 263-85-54, E-mail: Grachev_aa@spbstu.ru

Аннотация

Работа направлена на развитие методов прогнозирования сопротивления усталости и повышения надежности элементов металлических конструкций машин. Предложена методика расчета скорости развития усталостной трещины под действием циклического нагружения. В настоящее время основной методический подход к решению этой проблемы строится на использовании уравнения Пэриса, параметры которого определяются экспериментально. В данной работе показано преимущество перехода к использованию модифицированного уравнения Пэриса и предложена методика аналитического определения его параметра. В основе методики лежит допущение о дискретном развитии усталостной трещины и расчете количества циклов, необходимых для каждого скачка, с использованием уравнения Коффина-Мэнсона. Результаты расчета по предлагаемой методике подтверждаются сопоставлением с массивом экспериментальных данных.

Ключевые слова: усталость металлов, циклическое нагружение, развитие усталостной трещины, уравнение Пэриса, коэффициент интенсивности напряжений, пластическая деформация.

Введение

Усталостное повреждение характерно для металлических конструкций и деталей механизмов интенсивно эксплуатируемых машин. Оно состоит из двух стадий: накопления внутренних повреждений до возникновения макротрещины и развития этой трещины до опасного размера или полного разрушения. В реально работающей машине первую стадию определить, практически, невозможно. На второй стадии трещину можно обнаружить при техобслуживании машины. Если длительность второй стадии превышает интервал между техобслуживанием и ремонтами, то в процессе эксплуатации остается время для анализа ситуации и проведения ремонта. В противном случае произойдет внезапное разрушение детали или конструкции. Длительность развития усталостной трещины, как количество циклов нагружения, в течение которых возникшая усталостная трещина вырастет от начального размера до максимального безопасного размера, называют остаточным ресурсом. Возможность прогнозировать остаточный ресурс на стадии проектирования позволяет планировать частоту обследований и обуславливает живучесть и безопасность сооружения или машины.

Для вычисления остаточного ресурса необходима модель зависимости скорости развития трещины от параметров нагружения. Прогнозирование скорости развития усталостной трещины описывается в терминах механики разрушения. График зависимости скорости развития усталостной трещины от размаха, или максимального, или эквивалентного значения коэффициента интенсивности напряжений называется кинетической диаграммой усталостного разрушения (КДУР) [1–5]. Эта зависимость получается экспериментально путем испытания образцов с трещиной при циклическом нагружении. Такая процедура весьма затратна, так как требует системных испытаний достаточно крупных образцов в условиях циклического нагружения.

Для дальнейшего анализа и инженерного применения КДУР описывается аналитической зависимостью, параметры которой определяются экспериментально [6,7]. В данной работе проанализирована форма представления кинетической диаграммой усталостного разрушения и предложена методика аналитической оценки параметров КДУР для сталей, используемых для металлических конструкций машин.

Методы

Многочисленные испытания деталей с трещинами при циклическом нагружении показали, что зависимость скорости развития усталостной

трещины $v = da/dn$ от коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_I в логарифмических координатах в большинстве случаев имеет вид S-образной кривой [1,3]. В качестве аргумента этой зависимости в разных работах принимается максимальное или эквивалентное значение КИН, однако наиболее удобным для инженерного применения оказалось использование размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_I .

Расчетный размах КИН $\Delta K = \Delta K_{max} - \Delta K_{min}$ вычисляется как [1,2]

$$\Delta K = \xi_K \Delta \sigma \sqrt{\pi a}.$$

Здесь ξ_K – безразмерный коэффициент, зависящий от формы детали, и характера ее нагружения; $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$; σ_{max} и σ_{min} – максимальное и минимальное значения номинального напряжения в детали. Если минимальное напряжение оказывается отрицательным (сжимающим), то принимается $\sigma_{min} = 0$. При этом в запас надежности игнорируется тот факт, что закрытие трещины происходит при некотором напряжении $\sigma_{min} > 0$.

Форма КДУР $v = f(\Delta K_I)$ мало зависит от коэффициента асимметрии цикла нагружения, но искажается, если испытания проводятся в коррозионной среде или размер трещины весьма мал. Экспериментально полученный график зависимости $v = f(\Delta K_I)$ в логарифмических координатах включает три области (рис. 1, I, II, III): нелинейную зону малых скоростей, прилегающую к граничному значению КИН ΔK_{th} , центральную линейную область и зону интенсивного развития, которая заканчивается предельным значением ΔK_c , при котором происходит разрушение детали. Есть множество вариантов описания всего графика в области $\Delta K_{th} < \Delta K_I < \Delta K_c$ [6, 7 и др.], но в инженерной практике чаще используется уравнение Пэриса, которое описывает только среднюю область графика. Распространение этого выражения на область малых скоростей (рис. 1, кривая 2) дает завышенную скорость развития трещины и идет в запас надежности оценки остаточного ресурса. Занижение скоростей в области интенсивного развития трещины мало влияет на оценку живучести изделия и компенсируется снижением предельного значения ΔK_c .

Уравнение Пэриса, описывающее центральную часть этой диаграммы, имеет вид [2, 3, 7]

$$v_a = \Phi_K \Delta K_I^q. \quad (1)$$

Дефектность этой формы записи заключается в том, что в ней присутствует величина Φ_K , которая, во-первых, имеет корреляционную связь с показателем q [6], а, во-вторых, имеет переменную размерность

$[m^{1-0,5q} \text{МПа}^{-q}]$. Величина, размерность которой зависит от погрешности определения показателя степени q , лишена физического смысла.

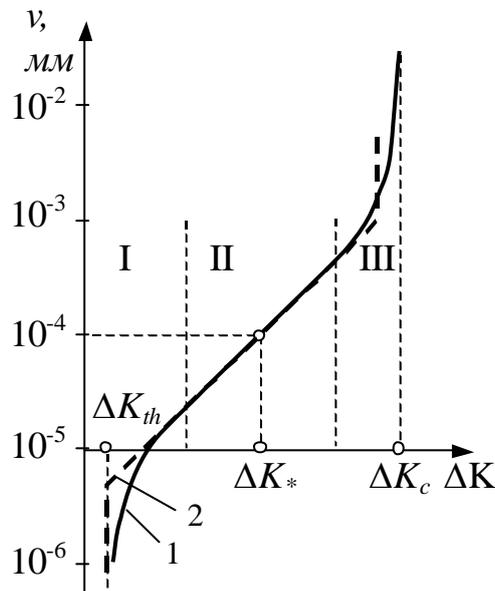


Рис. 1. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения

В связи с этим значительно правильнее записать то же выражение в форме модифицированного уравнения Пэриса [7, 8]

$$v_a = \frac{da}{dn} = V_* \left(\frac{\Delta K_I}{\Delta K_*} \right)^q, \quad (2)$$

где $V_* = 10^{-7}$ м/цикл; $\Delta K_* = \sqrt[q \frac{V_*}{\Phi_K}]$ – параметр уравнения, равный значению

размаха КИН, при котором скорость развития трещины $v_a = V_*$ (рис.1).

Многочисленные экспериментальные исследования показали, что для широкого диапазона сталей показатель степени $q = 2,5 - 3,5$, поэтому в нормативных документах обычно принимается $q = 3$ [9, 10]. Значение параметра ΔK_* имеет существенный разброс и изменяется в диапазоне от 18 до 45 МПа√м.

Количество циклов, в течение которых трещина подрастет от начального размера a_0 до конечного a_1 можно вычислить, проинтегрировав выражение (2), как

$$N_a = \int_{a_0}^{a_1} \frac{1}{V_*} \left(\frac{\Delta K_*}{\Delta K_I} \right)^q da. \quad (3)$$

Используя этот алгоритм, можем оценить, на сколько существенно влияет погрешность определения параметров q и ΔK_* на результат расчетной оценки долговечности детали с трещиной. Так, например,

вычислим количество циклов, в течение которых краевая трещина в полосе шириной $B = 200$ мм подрастет от 5 мм до 30 мм при действии регулярного нагружения по отнулевому циклу с размахом напряжений $\Delta\sigma = 120$ МПа. Варьирование показателя q в диапазоне $q = 2,5 - 3,5$ при $\Delta K_* = 25$ МПа $\sqrt{м}$ приводит к изменению расчетной долговечности N_a на 15 – 40%. Изменение ΔK_* в указанном интервале от 18 до 45 МПа $\sqrt{м}$ при $q = 3$ приводит к изменению расчетной долговечности от 2 до 12 раз. Этот пример показывает, что значение параметра ΔK_* очень существенно влияет на оценку живучести конструкции с трещиной, поэтому необходимо иметь достаточно надежную оценку данной величины.

Экспериментальное определение ΔK_* сопряжено с определенными трудностями и требует специального оборудования для циклического нагружения образца и измерения усталостной трещины. Данная работа посвящена разработке методики прогнозирования параметра ΔK_* для сталей, применяемых в сварных металлических конструкциях. Для подтверждения методики использованы результаты испытаний различных образцов, приведенные в научно-технической литературе.

Предлагаемая методика расчетного определения параметра ΔK_* строится на базе следующих положений:

1. Эксперименты показывают, что скорость продвижения трещины на среднем участке кинетической диаграммы усталостного разрушения составляет $10^{-5} - 10^{-3}$ мм/цикл. То есть за цикл трещина продвигается на расстояние, меньшее, чем размер зерна стали. Такой процесс не может быть равномерным по всему фронту, поэтому будем считать, что развитие усталостной трещины происходит дискретно [11, 12]. То есть за Δn циклов в некоторой малой области перед вершиной трещины накапливается критическое повреждение и трещина продвигается на расстояние Δa . Размер Δa должен быть достаточно большим, чтобы к нему можно было применять свойство материала, полученные по стандартным методикам, то есть с учетом всех статистических закономерностей влияния ориентации и границ зерен, химической неоднородности и дефектов его структуры. С другой стороны он должен быть не более размера зоны, в которой происходит циклически изменяющиеся пластические деформации. С учетом того, что размер зерна строительных сталей составляет 5 – 30 мкм можно предположить, что Δa должен быть не меньше 0,1 – 0,2 мм.

2. Количество циклов, достаточных для продвижения трещины на Δa , можно вычислить по уравнения Коффина-Мэнсона, пренебрегая слагаемым, описывающим повреждение от упругой составляющей, то есть [11, 13]

$$\Delta \varepsilon_p^u \Delta n = C. \quad (4)$$

Здесь $\Delta\varepsilon_p$ – размах интенсивности пластической деформации в вершине трещины. По результатам экспериментальных исследований показатель степени $u = 1,4-1,7$ [11, 13].

Постоянная C характеризует предельную деформацию материала при однократном нагружении. С учетом объемности напряженного состояния материала в вершине трещины определим ее по методике Н.А.Махутова как [13]

$$C = -0,5D_e \ln(1 - \psi).$$

Здесь ψ – относительное сужение при разрыве, которое для строительных сталей составляет $\psi = 0,6 - 0,7$. Коэффициент D_e учитывает влияние объемности напряженного состояния и в зависимости от степени концентрации напряжений составляет $D_e = 0,14 - 0,60$ [13]. При весьма малых размерах пластической зоны в вершине усталостной трещины реализуется напряженное состояние близкое к плоской деформации, поэтому примем $D_e = 0,2$. С учетом этого получим $C = 0,09 - 0,12$, в дальнейших расчетах используем значение $C = 0,1$.

3. При сравнительно малых значениях КИН, при которых происходит развитие усталостной трещины, пластическая зона в вершине трещины весьма мала и пластические деформации контролируются окружающим упругим полем деформаций. Интенсивность пластических деформаций в области размером Δa , расположенной перед вершиной трещины можно определить по формуле [8, 13]

$$\varepsilon_p = \gamma \frac{\sigma_T}{E} \left(\frac{K_I}{\sigma_T \sqrt{\pi \Delta a}} \right)^2. \quad (5)$$

Для определения коэффициента γ_1 проанализируем результаты конечно-элементного расчета растянутой полосы шириной b , толщиной t с краевой трещиной длиной a (рис. 2, а). Использовались три модели с размерами: №1 $b = 100$ мм, $t = 16$ мм, $a = 20$ мм, №2 $b = 400$ мм, $t = 20$ мм, $a = 10$ мм №3 $b = 400$ мм, $t = 20$ мм, $a = 40$ мм. Размер конечных элементов в области вершины трещины в модели 1 составлял 0,1 мм, а в моделях 2 и 3 – 0,17 мм (рис. 2, а, условно показан фрагмент сетки). Расчет выполнен по алгоритму нелинейной статики (NLStatic) при $\sigma_T = 300$ МПа.

На этих моделях определены значения интенсивности пластической деформации в самом нагруженном элементе перед вершиной трещины (рис. 2, а, позиция 1). Расчет показал, что процесс развития пластических деформаций при нагружении полосы с трещиной, реализованный методом конечных элементов, может быть приближенно описан выражением (5) при коэффициенте $\gamma = 0,15$ (рис. 2, б, кривые 2 для модели 1 и 3 – для моделей 2 и 3).

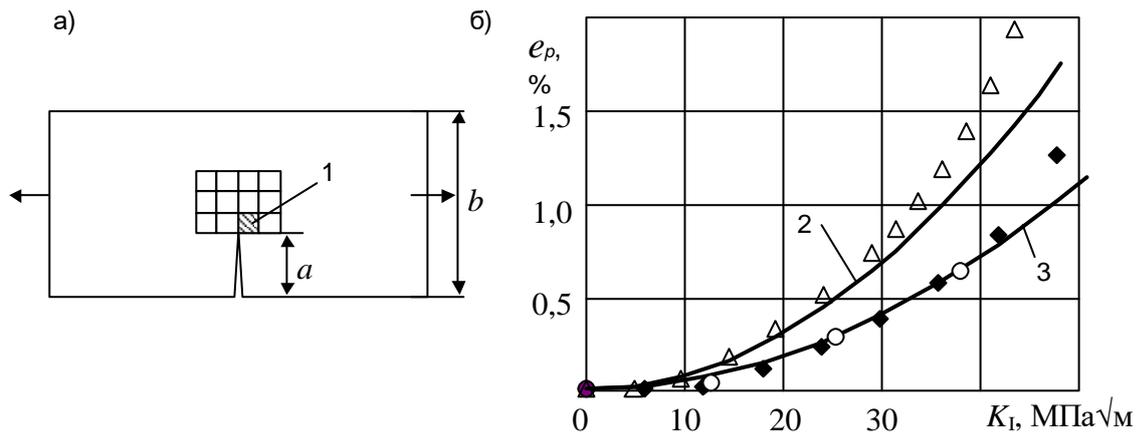


Рис. 2. Схема модели (а) и графики зависимости пластической деформации от значения КИН (б). Δ , \blacklozenge , \circ – модели №1, 2 и 3

4. Количество циклов, необходимых для создания усталостного повреждения в зоне Δa найдем, подставив (5) в выражение (4) и заменив максимальные значения пластической деформации и КИН на размахи, при этом получится

$$\Delta n = \frac{C}{\Delta \varepsilon_p^u} = \frac{C(\pi \Delta a E \sigma_T)^u}{\gamma^u \Delta K_I^{2u}}$$

Следовательно, скорость развития усталостной трещины

$$v_a = \frac{\Delta a}{\Delta n} = \frac{\gamma^u \Delta K_I^{2u} \Delta a}{C(\pi \Delta a E \sigma_T)^u} \quad (6)$$

В этом выражении получена зависимость $v_a = f(\Delta K_I^{2u})$, где $2u = 2,8 - 3,4$. Это соответствует экспериментально подтвержденному интервалу значений показателя q в выражении (2). Данное обстоятельство позволяет в рамках предлагаемой модели считать, что параметр Δa практически не зависит от ΔK_I .

Выражение (6) дает возможность сделать аналитическую оценку параметра ΔK_* . Согласно (2) при $\Delta K_I = \Delta K_*$ скорость развития трещины составляет V_* . Следовательно, из (6) найдем

$$\Delta K_* = \left(\frac{C V_*}{\Delta a} \right)^{\frac{1}{2u}} \sqrt{\frac{\pi E \sigma_T \Delta a}{\gamma}} \quad (7)$$

Результаты

Для проверки зависимости (7) использованы экспериментальные данные о параметрах кинетической диаграммы усталостного разрушения.

В литературных источниках, как правило, результаты исследования процессов развития усталостных трещин представляют в форме параметров уравнения Пэриса (1). В данной работе по значениям параметров Φ_K и q , полученным из литературных источников, вычислялось значение ΔK_* (2). Для обработки выбирались результаты испытания сталей с пределом текучести $\sigma_T \leq 600$ МПа, которые используются или могли бы использоваться в сварных металлических конструкциях машин. Все результаты испытаний получены при циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии $R = 0 - 0,2$. Массив полученных данных приведен в таблице 1. На рис. 3 расчетные графики зависимости $K_* = f(\sigma_T)$ при $\Delta a = 0,1$ (кривая 1) и $\Delta a = 0,2$ (кривая 2) сопоставлены с результатами экспериментальной оценки параметра K_* .

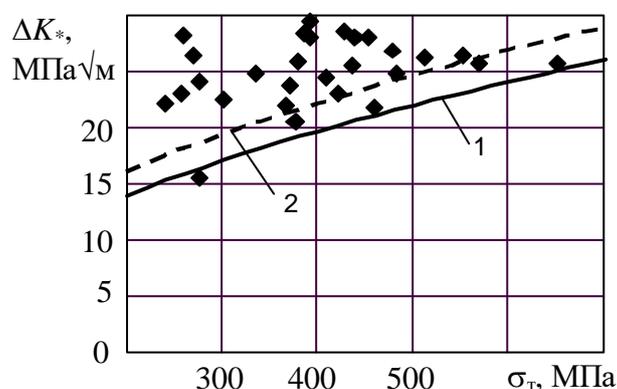


Рис. 3. Графики зависимости $\Delta K_* = f(\sigma_T)$ по формуле (7) (кривые 1 и 2) и результаты экспериментального определения параметра ΔK_* (\blacklozenge , таблица).

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований скорости распространения усталостных трещин в сталях

№	Марка стали	Предел текучести, МПа	ΔK_* , МПа√м	m	Источник
1.	Техническое железо	240	22,0	2,9	[14]
2.	30ХГСТ	550	26,3	3,5	[14]
3.	Ст3сп	275	15,5	2,4	[14]
4.	09Г2С	334	24,8	2,8	[14]
5.	10ХСНД	452	27,9	2,9	[14]
6.	16Г2АФ	481	24,8	2,8	[14]
7.	1020	275	24,0	3.0	[15]

8.	S355	390	28,0	3,5	[16]
9.	S355	419	30,1	3,6	[17]
10.	S690	766	21,9	2,9	[17]
11.	A	378	25,8	3,4	[18]
12.	B	510	26,2	3,6	[18]
13.	C	385	28,4	3,2	[18]
14.	Q345qC	458	24,0	2,7	[19]
15.	16MnR	370	23,7	3,4	[20]
16.	2.25Cr1Mo	478	26,8	2,9	[20]
17.	2.25Cr1MoV	568	25,6	2,6	[20]
18.	S235	258	28,2	3,4	[21]
19.	S355	390	29,3	3,1	[21]
20.	C45	650	25,7	3,5	[21]
21.	EN36	435	25,5	3,3	[22]
22.	HPS	438	28,0	3,3	[23]
23.	350WT	365	21,8	3,0	[23]
24.	Tubular Steel	426	28,5	3,2	[24]
25.	ABS-C	269	26,4	3,0	[25]
26.	Mild Steel	300	29,8	4,39	[26]
27.	Ст3	255	22,4	3,7	[27]
28.	15XCHД	300	24,5	3,5	[27]
29.	BS986	375	20,4	3,1	[28]

Обсуждение

Представленные данные показывают, что зависимость (7) при $\Delta a = 0,1$ мм удовлетворительно описывает нижнюю границу разброса значений этого параметра для сталей с пределом текучести $\sigma_T \leq 600$ МПа. Стали более высокой прочности имеют более сложный химический состав и структуру, поставляются в термообработанном виде и обычно отличаются меньшей пластичностью. Они требуют более индивидуального подхода к оценке циклической трещиностойкости, и предлагаемые зависимости на них не распространяются.

Заключение

Показано, что в инженерных приложениях для прогнозирования периода развития усталостной трещины более рационально использовать модифицированное уравнение Пэриса, а не его авторскую форму. Представленные результаты показывают, что нижняя граница разброса параметра модифицированного уравнения Пэриса для сталей с пределом

текучести $\sigma_T \leq 600$ МПа может быть определена с достаточной точностью с помощью предлагаемой методики.

Для инженерной оценки остаточного ресурса элементов конструкции целесообразно использовать зависимость (3), в которое подставлять значение параметра ΔK^* , вычисленное по выражению (7) при $\Delta a = 0,1$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения / М.: / Физматлит. 2006. 328 с.
- [2] Крыжевич Г.Б. Механика разрушения металлических конструкций. /СПб. ФГУП «Крыловский государственный научный центр». 2021. 184 с.
- [3] J.M.Barsom, S.T.Rolfe. Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics. Second Edition. 1987. 628 p.
- [4] T. Yokobori. Theory of particle transport phenomena during fatigue and time-dependent fracture of materials based on mesoscale dynamics and their practical applications. Proc. Jpn. Acad., Ser. B 96, N 9 (2020). <http://dx.doi.org/10.2183/pjab.96.029>
- [5] Никитин И. С., Бураго Н. Г., Никитин А. Д. Повреждаемость и усталостное разрушение элементов конструкций в различных режимах циклического нагружения. Прикладная математика и механика 2022, том 86, № 2, с. 257–271.
- [6] Ромвари П., Тот Л. Анализ закономерностей распространения усталостных трещин в металлах. Проблемы прочности. 1980, №12, с. 18-28.
- [7] Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В.В. –Киев: Наук. думка. Т.4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романив О.В., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. –1990. 680 с.
- [8] Соколов С.А. Критерии работоспособности металлических конструкций машин. Проектирование с применением МКЭ / СПб.: Страта, 2023. – 202 с.
- [9] British Standard BS 7910:2005. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. BSI 2007.
- [10] BS 7608:2014 Guide to fatigue design and assessment of steel products. The British Standards Institution. 2014.
- [11] Циклическая деформация и усталость металлов. В 2-х т. Т.1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов / Трощенко В.Т. Хамаза Л.А., Покровский В.В. и др. Под ред. Трощенко В.Т. – Киев: Наук. Думка, 1985. –216 с.

- [12] Циклическая деформация и усталость металлов. В 2-х т. Т.2. Долговечность металлов с учетом эксплуатационных и технологических факторов / Трощенко В.Т. Хамаза Л.А., Покровский В.В. и др. Под ред. Трощенко В.Т. – Киев: Наук. Думка, 1985. –224 с.
- [13] Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. /Н.А.Махутов, –Новосибирск: Наука, 2005. –Ч.1: Критерии прочности и ресурса. –494 с.
- [14] Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В.В. –Киев: Наук. думка. Т.4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романив О.В., Ярема С.Я., Никифорчин Г.Н. и др. –1990. 680 с.
- [15] S.E.Ferreira, J.T.Pinho de Castro, M.A.Meggiolaro Using the strip-yield mechanics to model fatigue crack growth by damage accumulation ahead of the crack tip. *International Journal of Fatigue*. 103 (2017), pp. 557-575.
- [16] B. Pedrosa, J. Correia, G. Lesiuk, C. Rebelo, M. Veljkovic. Fatigue crack growth modelling for S355 structural steel considering plasticity-induced crack-closure by means of UniGrow model. *International Journal of Fatigue*. 164 (2022), pp. 107-120.
- [17] A.M.P. de Jesus, R.Matos, B.F.C. Fontoura, C. Rebelo, L.S. da Silva, M. Veljkovic. A comparison of the fatigue behavior between S355 and S690 steel grades. *Journal of Constructional Steel Research*. 79 (2012), 140-150.
- [18] Y. Hyodo, M. Yuga, Y. Kurihara, T-H. Doan, T. Sakimoto, Y. Murakami, K. Gotoh, T. Tagawa. Improvement of Fatigue Crack Propagation Property in Low. *ISIJ International*, Vol. 63 (2023), No. 10, pp. 1738–1746.
- [19] L. Ke, Y. Li, C. Li, Z. Feng, F. Zhu, L. Liang, S. Mei. Experimental and probabilistic study of fatigue crack growth behavior of steel Q345qC under different stress ratios. *Social Science Research...*, August 2023. Engineering, Materials Science. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4387404>
- [20] Z. Gao, W. Sun, Y. Wang, F. Zhang. Fatigue crack growth properties of typical pressure vessel steels at high temperature. 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18). Beijing, China, August 7-12, 2005. Pp. 1754-1761.
- [21] H.A.Richard, M. Sander, Ermuedungsriiss. Erkennen, sicher beutreiben, vermeiden. 2. Auflage. Springer. 2012. 259 p.
- [22] Q. Zhu, P. Zhang, X. Peng, L. Yan, G. Li. Fatigue Crack Growth Behavior and Fracture Toughness of EH36 TMCP Steel. *Materials* 2021, 14, 6621. <https://doi.org/10.3390/ma14216621>
- [23] H. Chen, R.G. Driver. Fatigue Resistance of High Performance Steel. Structural Engineering Report 258. Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta. Edmonton, Alberta, Canada. 2005.
- [24] S. Shankare Gowda Fatigue crack propagation in tubular steel of offshore structures. *Rakenteiden Nekaniikka*, Vol. 18 No. 4. 1985, s. 3 – 18.

- [25] Barsom J.M. Fatigue-crack Propagation in Steels of Various Yield Strengths. Journal of engineering for Industry. 1971. Vol. 93. Series B, No. 4. Pp.1190-1196.
- [26] C. L. Chow, C. W. Woo and k. T. Chung. Fatigue crack propagation in mild steel. Engineering Fracture Mechanics. 1986. Vol. 24, No. 2, pp. 233-241.
- [27] Труфяков В.И., Кныш В.В., Михеев П.П., Кузьменко А.З. Зависимость скорости развития усталостной трещины от асимметрии цикла. Проблемы прочности, 1987, № 3, с.5-7.
- [28] Maddox S.J. Fatigue Crack propagation data obtained from parent plate, weld metal and HAZ in structural steels. Welding Research Intren. Vol. 4, № 1, 1974, p. 36-60.

S.A. Sokolov, A.A. Grachov

PREDICTION OF FATIGUE CRACK DEVELOPMENT RATE

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The work is aimed at the development of methods for predicting fatigue resistance and enhancing the reliability of elements of metal structures of machines. A methodology for calculating the rate of fatigue crack development under the action of cyclic loading is proposed. At present, the main methodological approach to solving this problem is based on the use of the Paris equation, the parameters of which are determined experimentally. This paper illustrates the advantage of transitioning to the use of the modified Paris equation and proposes a technique for analytical determination of its parameter. The proposed method is based on the assumption of discrete fatigue crack development and calculation of the number of cycles required for each jump using the Coffin-Manson equation. The validity of the proposed methodology is confirmed by a comparison of the results with an array of experimental data.

Key words: metal fatigue, cyclic loading, fatigue crack development, Paris equation, stress intensity coefficient, plastic deformation.

REFERENCES

- [1] Babichev D.T., Lebedev S.Yu. A new methodology of kinematic analysis Matvienko Yu.G. Models and criteria of destruction mechanics / M.: / Fizmatlit. 2006. 328 p.

- [2] Kryzhevich G.B. Mechanics of destruction of metal structures. /St. Petersburg. FSUE "Krylov State Scientific Center". 2021. 184 p.
- [3] J.M.Barsom, S.T.Rolfe. Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics. Second Edition. 1987. 628 p.
- [4] T. Yokobori. Theory of particle transport phenomena during fatigue and time-dependent fracture of materials based on mesoscale dynamics and their practical applications. Proc. Jpn. Acad., Ser. B 96, N 9 (2020). <http://dx.doi.org/10.2183/pjab.96.029>
- [5] Nikitin I. S., Burago N. G., Nikitin A.D. Damage and fatigue failure of structural elements in various cyclic loading modes. Applied Mathematics and Mechanics 2022, volume 86, No. 2, pp. 257-271.
- [6] Romvari P., Toth L. Analysis of patterns of fatigue crack propagation in metals. Problems of durability. 1980, No. 12, pp. 18-28.
- [7] Fracture mechanics and strength of materials: Reference. manual: 4 volumes / Under the general editorship. Panasyuk V.V. – Kiev: Nauk. dumka, vol. 4.: Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials / Romaniv O.V., Yarema S.Ya., Nikiforchin G.N. et al. -1990. 680 p.
- [8] Sokolov S.A. Criteria for the operability of metal structures of machines. Design using FEM / St. Petersburg: Strata, 2023. 202 p.
- [9] British Standard BS 7910:2005. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. BSI 2007.
- [10] BS 7608:2014 Guide to fatigue design and assessment of steel products. The British Standards Institution. 2014.
- [11] Cyclic deformation and fatigue of metals. In 2 volumes, vol. 1. Low-cycle and multi-cycle fatigue of metals / Troshchenko V.T. Khamaza L.A., Pokrovsky V.V. et al. Edited by Troshchenko V.T. – Kiev: Nauk. Dumka, 1985. -216 p.
- [12] Cyclic deformation and fatigue of metals. In 2 volumes Vol.2. Durability of metals taking into account operational and technological factors / Troshchenko V.T. Khamaza L.A., Pokrovsky V.V. et al. Edited by Troshchenko V.T. – Kiev: Nauk. Dumka, 1985. -224 p.
- [13] Makhutov N.A. Structural strength, resource and technogenic safety: In 2 parts /N.A.Makhutov, Novosibirsk: Nauka, 2005. – Part 1: Criteria of strength and resource. -494 p .
- [14] Fracture mechanics and strength of materials: Reference. manual: 4 volumes / Under the general editorship. Panasyuk V.V. – Kiev: Nauk. dumka, vol. 4.: Fatigue and cyclic crack resistance of structural materials / Romaniv O.V., Yarema S.Ya., Nikiforchin G.N. et al. -1990. 680 p.
- [15] S.E.Ferreira, J.T.Pinho de Castro, M.A.Meggiolaro Using the strip-yield mechanics to model fatigue crack growth by damage accumulation ahead of the crack tip. International Journal of Fatigue. 103 (2017), pp. 557-575.

- [16] B. Pedrosa, J. Correia, G. Lesiuk, C. Rebelo, M. Veljkovic. Fatigue crack growth modelling for S355 structural steel considering plasticity-induced crack-closure by means of UniGrow model. *International Journal of Fatigue*. 164 (2022), pp. 107-120.
- [17] A.M.P. de Jesus, R.Matos, B.F.C. Fontoura, C. Rebelo, L.S. da Silva, M. Veljkovic. A comparison of the fatigue behavior between S355 and S690 steel grades. *Journal of Constructional Steel Research*. 79 (2012), 140-150.
- [18] Y. Hyodo, M. Yuga, Y. Kurihara, T-H. Doan, T. Sakimoto, Y. Murakami, K. Gotoh, T. Tagawa. Improvement of Fatigue Crack Propagation Property in Low. *ISI International*, Vol. 63 (2023), No. 10, pp. 1738–1746.
- [19] L. Ke, Y. Li, C. Li, Z. Feng, F. Zhu, L. Liang, S. Mei. Experimental and probabilistic study of fatigue crack growth behavior of steel Q345qC under different stress ratios. *Social Science Research...*, August 2023. Engineering, Materials Science. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4387404>
- [20] Z. Gao, W. Sun, Y. Wang, F. Zhang. Fatigue crack growth properties of typical pressure vessel steels at high temperature. 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18). Beijing, China, August 7-12, 2005. Pp. 1754-1761.
- [21] H.A.Richard, M. Sander, Ermuedungsriiss. *Erkennen, sicher beutreiben, vermeiden*. 2. Auflage. Springer. 2012. 259 p.
- [22] Q. Zhu, P. Zhang, X. Peng, L. Yan, G. Li. Fatigue Crack Growth Behavior and Fracture Toughness of EH36 TMCP Steel. *Materials* 2021, 14, 6621. <https://doi.org/10.3390/ma14216621>
- [23] H. Chen, R.G. Driver. Fatigue Resistance of High Performance Steel. Structural Engineering Report 258. Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta. Edmonton, Alberta, Canada. 2005.
- [24] S. Shankare Gowda Fatigue crack propagation in tubular steel of offshore structures. *Rakenteiden Nekaniikka*, Vol. 18 No. 4. 1985, s. 3 – 18.
- [25] Barsom J.M. Fatigue-crack Propagation in Steels of Various Yield Strengths. *Journal of engineering for Industry*. 1971. Vol. 93. Series B, No. 4. Pp.1190-1196.
- [26] C. L. Chow, C. W. Woo and k. T. Chung. Fatigue crack propagation in mild steel. *Engineering Fracture Mechanics*. 1986. Vol. 24, No. 2, pp. 233-241.
- [27] Trufiakov V.I., Knysh V.V., Mikheev P.P., Kuzmenko A.Z. Dependence of the fatigue crack development rate on cycle asymmetry. *Problems of Strength*, 1987, No. 3, pp.5-7.
- [28] Maddox S.J. Fatigue Crack propagation data obtained from parent plate, weld metal and HAZ in structural steels. *Welding Research Intren*. Vol. 4, № 1, 1974, p. 36-60.