

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 62:9. 122.004.621.434

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В СТАЛИ  
ПРИ НИЗКОМ УРОВНЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ© 2020 г. С. Г. Лебединский<sup>1,\*</sup>, Г. В. Москвитин<sup>1</sup>, М. С. Пугачев<sup>1</sup>, А. Н. Поляков<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

\*e-mail: SLebedinski@Yandex.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

Предложен метод оценки закономерностей развития усталостных трещин в области низкой скорости их развития при эксплуатационном нагружении. Метод основан на снижении уровня нерегулярного процесса нагружения при сохранении его подобия по мере роста трещины. Управляющим фактором снижения нагрузки является естественное увеличение податливости образца с ростом трещины при фиксированном процессе ее раскрытия. Получены экспериментальные зависимости скорости развития трещины от числа блоков эксплуатационного нагружения по мере снижения его уровня.

*Ключевые слова:* эксплуатационное нагружение, низколегированная сталь, усталостные трещины, развитие трещин при низком уровне нагружения, железнодорожные конструкции

DOI: 10.31857/S0235711920020108

Исследованию закономерностей развития усталостных трещин при нерегулярном эксплуатационном нагружении, поиску надежных критериев прочности и их экспериментально-теоретическому обоснованию посвящено значительное число работ [1, 2]. Процессы накопления повреждений, особенно при низких, предпороговых уровнях нагружения, когда трещина проходит стадии локального формирования и последующего продвижения, являются многофакторными закономерностями [3, 4]. Учитывая сложный характер развития трещин при нерегулярном нагружении [5], для дальнейших теоретических обобщений важно накапливать экспериментальные данные о развитии усталостных трещин на низких уровнях эксплуатационного нагружения, приближаясь к их пороговым значениям.

Проведенные экспериментальные исследования [6] позволяют сделать вывод, что общая закономерность развития усталостных трещин при эксплуатационных нагрузках, характерных для деталей железнодорожных конструкций и для исследуемого класса низколегированных сталей, отвечает стандартной кинетической диаграмме усталостного разрушения (КДУР) материала. Но пороговый уровень коэффициента интенсивности напряжений (КИН) –  $K_{Ih}$  нужно определять с учетом параметров нерегулярности эксплуатационного нагружения.

**Метод определения закономерности изменения скорости развития трещины при снижении уровня эксплуатационного нагружения.** Когда процесс нагружения имеет нерегулярный характер, его уровень должен снижаться так, чтобы при этом сохранялись основные соотношения между циклами и очередностью действия исходного процесса.

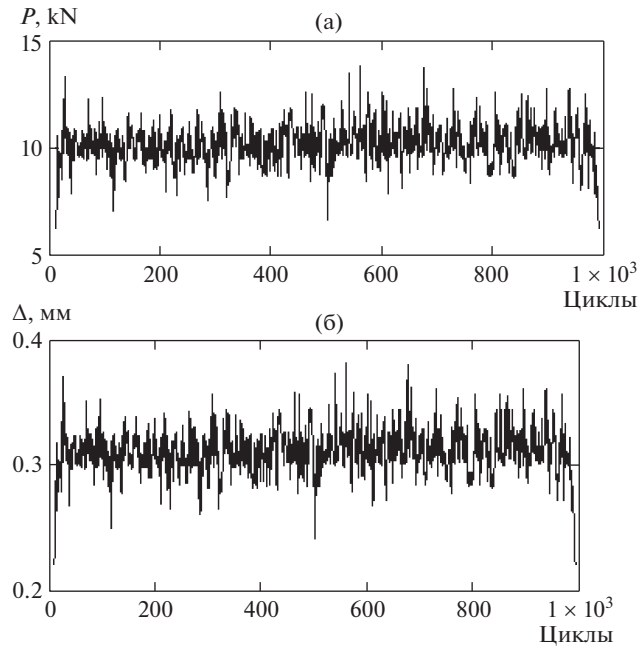
Т.е., должно сохраняться подобие первоначального процесса, но при этом обеспечиваться постепенное снижение уровня эксплуатационного нагружения.

Рассмотрим пример. При действии на стандартный образец типа 3 (внецентренное растяжение) с растущей трещиной под действием блока эксплуатационной нагрузки проведена запись сигнала с двухконсольного экстензометра. Установка датчика проводилась по обычной схеме для измерения смещения: на торцевой поверхности образца с помощью накладных опорных призм (ГОСТ 25.506-85). Таким образом, был записан процесс смещения берегов трещины при мягком нагружении. Затем, делается переход на жесткое нагружение. Тем самым, воспроизводится зафиксированная запись процесса податливости испытываемого образца с начальной скоростью развития усталостной трещины. В первый момент, когда трещина еще не сместилась, такая программа будет давать процесс нагружения, полностью идентичный исходному. С развитием трещины, жесткость образца снижается и возрастает его податливость. Следовательно, чтобы отработать записанный ранее с экстензометра процесс нужно будет с ростом трещины все меньше прикладывать усилия. Т.е., нагрузка при жестком нагружении с ростом трещины будет постепенно снижаться, сохраняя подобие исходного эксплуатационного процесса. Т.к. развитие усталостных трещин в предпороговой области КДУР определяет величина коэффициента интенсивности напряжения, то важно провести анализ, как при таких условиях будет изменяться именно этот параметр. Поэтому, для конкретного размера образца с фиксированной длиной трещины, начиная с которой проводятся испытания, при которых можно расчетным путем дать предварительную оценку закономерности изменения КИН. Из проведенного анализа следует, варьируя двумя противоположными зависимостями (увеличением КИН с ростом трещины и снижением КИН, т.к. уровень нагрузки будет падать из-за увеличения податливости образца) можно получить разные значения градиента снижения уровня КИН, что позволяет планировать нужные условия эксперимента. К указанным факторам следует еще добавить выбор размеров образца, выбор начальной длины трещины и ее начального значения скорости, а также геометрические параметры относительно вершины трещины и точек установки экстензометра.

**Проведение эксперимента по изложенному методу.** Процесс нагружения проводится на стандартном компактном образце типа 3 для внецентренного растяжения (ГОСТ 25.506-85) с размерами  $125 \times 120 \times 10$  мм. Образец вырезан из литой надрессорной балки грузового вагона [6]. Материал балки – низколегированная сталь 20Л (химический состав стали: С 0.2104; Мн 1.085; Si 0.292;  $P < 0.0030$ ; S 0.020; Cr 0.108; Ni 0.130; Cu 0.215;  $V < 0.0030$ ; Fe 97.91). Начальная скорость трещины, при мягком нагружении составляла  $V = 5.495 \times 10^{-7}$  м/блок. Вместе с этим, шла запись сигнала с экстензометра, которая далее использовалась при жестком нагружении. Начальная длина трещины при жестком нагружении составляла  $L_0 = 36.1$  мм от линии приложения нагрузки. От этой величины трещины отслеживался дальнейший ее прирост  $\Delta L$  (мм) с помощью цифрового микроскопа. По мере роста трещины нагрузка уменьшалась. Это уменьшение определялось величиной  $\Delta P$  (кН), отсчитываемой от первоначального значения  $P_{\max} = 14.742$  кН – максимальной величины в первом блоке после перехода на жесткое нагружение (раскрытия трещины). Последовательность этих действий в реальных измерениях приведена на рис. 1. Скорость процесса выбрана около трех циклов в секунду. Это продиктовано типом процесса и точностью его отработки на образце [6].

В ходе испытаний регистрировались показания динамометра и соответствующие им смещения берегов трещины (перемещений точек установки экстензометра). Частота опроса составляла 5000 точек в минуту на каждом канале.

По графикам (рис. 2) отслеживалось смещение точки (1), определяющее максимальную нагрузку каждого блока (соответствующий цикл показан на верхнем графике).



**Рис. 1.** Экспериментальный блок эксплуатационного нагружения образца. (а) – при мягком нагружении, (б) – регистрируемый сигнал с экстензометра.

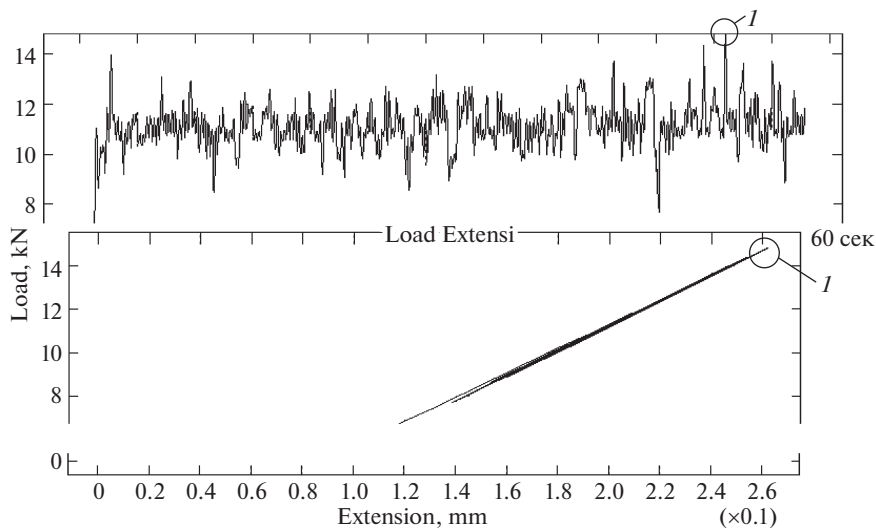
Смещение точки (1) при росте трещины по нижнему графику фиксировалось как величина  $\Delta P$  (kN) в соответствии с величиной подрастания трещины  $\Delta L$  (мм).

На рис. 3а показаны соответствующие закономерности, наблюдаемые с числом отработанных блоков. На рис. 3б показаны: 1 – закономерность изменения максимальной нагрузки (точка 1 на рис. 2) в блоке на величину  $\Delta P$  и соответствующее увеличение длины трещины на величину  $\Delta L$  – 2 от числа блоков нагружения  $N$ . На рис. 3б – распределения экстремальных значений процессов нагружения: 1 – первый блок после изменения режима управления и 2 – аналогичное распределение измененного процесса от развития трещины.

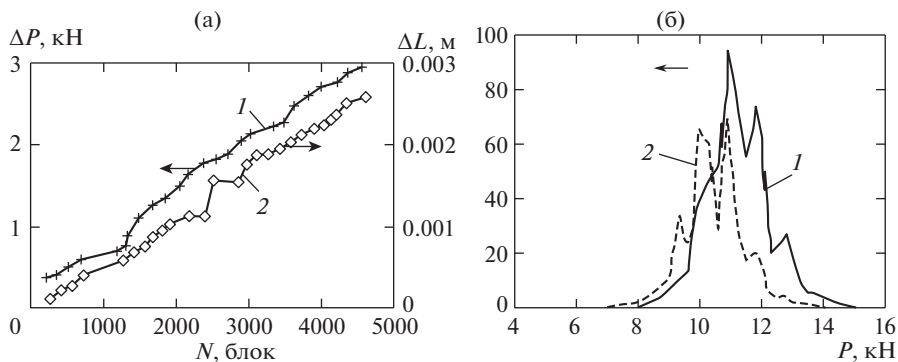
На рис. 4 показано изменение скорости  $V$  (м/блок) развития трещины, как от числа блоков нагружения  $N$  (рис. 4а), так и от снижения максимальной нагрузки в каждом блоке  $\Delta P$ , kN (рис. 4б). Можно отметить, что разброс скорости при ее снижении возрастает и трещина становится более чувствительной в своем развитии к неоднородности материала.

По экспериментальным точкам определены регрессионные зависимости и проведена их экстраполяция на значение скорости  $V = 0$ . Учитывая природу такого нестабильного характера процесса роста трещины, полученные экстраполяцией значения рассмотрим, как приближение к реальному пороговому уровню. Но так как достижение экспериментального порогового значения требует большого объема наработки, особенно в эксплуатационных блоках, которые воспроизводятся достаточно медленно, то даже приближенный прогноз во многом полезен.

После того, как была получена экспериментальная зависимость изменения податливости образца в виде функции  $\Delta P(\Delta L)$  и изменение ее от числа блоков, проведена оценка закономерности изменения значений КИН с учетом всех параметров экспери-



**Рис. 2.** Графики регистрации блока нагружения: нагрузка (кН) – время (сек) (верхний график); нагрузка (кН) – смещение берегов трещины (мм) в точках установки экстензометра (нижний график).



**Рис. 3.** (а) – снижение максимальной нагрузки (точка 1 на рис. 2) в блоке на  $\Delta P$  при соответствующем увеличении длины трещины  $\Delta L$  – (2) от числа блоков нагружения  $N$ ; (б) – распределения экстремальных значений процессов нагружения: 1 – при начале изменения режима управления и 2 – смещение распределения с развитием трещины.

мента. Рассмотрен интервал изменения длины трещины  $\Delta L = 0\text{--}2.345$  мм при соответствующем снижении максимальной нагрузки в блоке  $\Delta P = 0\text{--}2.8$  кН (точка 1 на рис. 2). Величина КИН определялась по известной зависимости для стандартного компактного образца типа 3 (ГОСТ 25.506-85) при коэффициенте асимметрии  $R = 0$ .

Результаты расчета в зависимости от числа блоков нагружения  $N$  приведены на рис. 5а.

**Анализ изменения параметров процесса нагружения с развитием трещины.** Для анализа изменения параметров процесса нагружения при снижении его уровня относительно исходного определены последовательности отношений минимального значения к ближайшему максимальному, считая это оценкой коэффициента асимметрии  $R$  по-

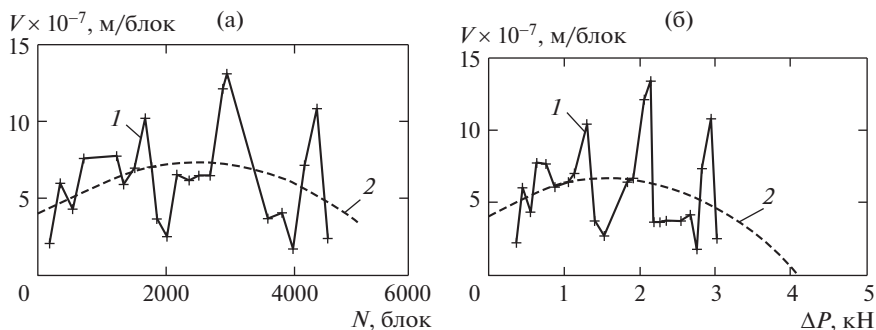


Рис. 4. (а) — зависимости скорости роста трещины от числа блоков нагружения  $N$ ; (б) — от снижения уровня нагружения  $\Delta P$  (1 — эксперимент, 2 — регрессионные зависимости с экстраполяцией,  $V = 0$ ).

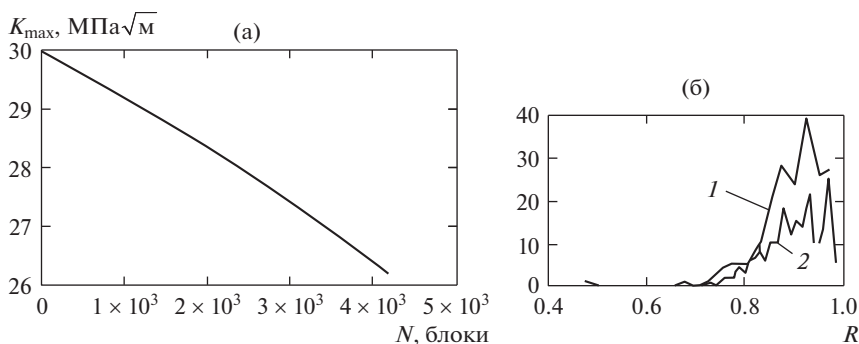


Рис. 5. (а) — изменение максимального значения КИН в блоке, при учете всех параметров эксперимента; (б) — распределения коэффициентов асимметрии  $R$  (при распределениях экстремумов процесса 1 и 2 на рис. 3б, соответственно).

следовательных циклов. На рис. 5б приведены распределения этих значений: для исходного уровня нагружения — 1 и сниженного — 2 (представлено в том же соответствии с распределениями экстремальных значений нагрузки на рис. 3б). Вместе с этим, анализировалось соотношение соответствующих максимумов и минимумов в обоих процессах. Это сделано практически для всего процесса в исходном варианте и сниженном. Получены достаточно стабильные соотношения (учитывая дискретизацию при записи сигнала), как для максимальных значений циклов, так и для минимальных. При снижении уровня экстремумы остаются пропорционально зависимыми, а амплитуда при этом уменьшается. Так, при сравнении по выборке из двадцати максимумов циклов начального процесса к соответствующим максимумам смещенного (рис. 3б) получена средняя величина отношения  $\gamma = 0.937$  (при интервале разброса: 0.970–0.917). При таком же объеме выборки для минимальных значений циклов  $\gamma = 0.936$  (при интервале разброса: 0.947–0.929).

Следуя этому выводу и используя результат экстраполяции по значению  $\Delta P = 4$  кН (рис. 4б) (при начальном значении нагрузки  $P_{\max} = 14.742$  кН), можно получить приближенную оценку порогового процесса нагружения. Величина отношения максимальной нагрузки в прогнозируемом блоке порогового уровня (точка 1 на рис. 2), при

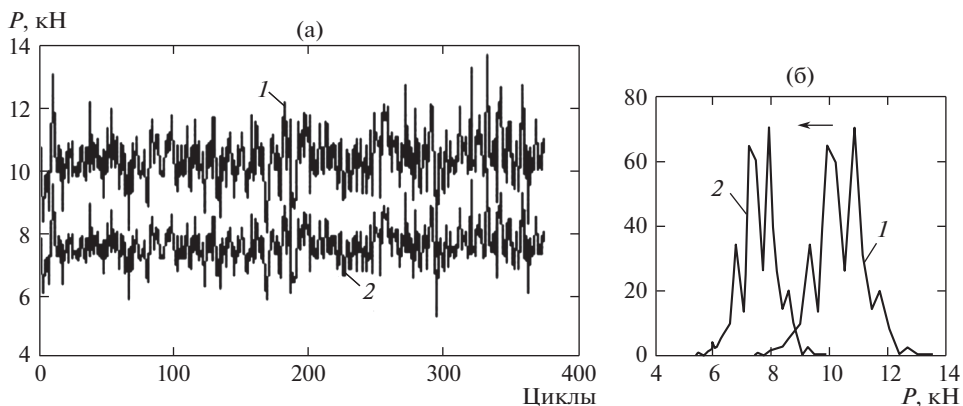


Рис. 6. (а) – процесс нагружения порогового уровня (2), подобного исходному (1); (б) – соответствующие распределения их экстремумов.

действию которого трещина не будет развиваться ( $V = 0$ ), к аналогичному значению при исходном уровне процесса составляет  $\gamma = 0.729$ . При этом, длина трещины по регрессионной зависимости рис. 3а для 5900 блоков должна увеличиться на  $\Delta L = 3.493$  мм от исходного значения (36.1 мм от линии приложения нагрузки) (рис. 6а). На рис. 6б показаны исходное распределение нагрузки (1) и прогнозируемое пороговое (2), экстремумы которого получены умножением на  $\gamma = 0.729$ .

**Выводы.** 1. Предложен метод оценки закономерностей развития усталостных трещин при эксплуатационном нагружении в области низкой скорости их развития. Управляющим фактором снижения нагрузки является естественное увеличение податливости образца с ростом трещины при воспроизведении фиксированного процесса раскрытия ее берегов. 2. Метод позволяет моделировать разную степень снижения коэффициента интенсивности напряжения при сохранении подобия нерегулярности исходного эксплуатационного процесса нагружения. 3. Проведена экспериментальная апробация метода на модели эксплуатационного нагружения, характерного для железнодорожного транспорта с использованием образца из низколегированной стали 20Л. 4. Исследована закономерность изменения параметров процесса нагружения с ростом трещины и соответствующее снижение его уровня. Соотношение максимальных и минимальных значений соответствующих циклов (экстремумов) остается постоянным и зависит от уровня снижения. Это позволяет считать процесс подобным с коэффициентом подобия, соответствующим каждому уровню снижения. 5. С использованием полученных в эксперименте зависимостей  $V(N)$  и  $V(\Delta P)$  проведена по регрессионным зависимостям экстраполяция параметра снижения нагрузки  $\Delta P$  на уровень нулевого значения скорости и построена модель порогового процесса подобного первоначально заданному. Коэффициент подобия составил 0.729 относительно исходного процесса. Учитывая повышающийся при снижении скорости трещины ее разброс, полученные результаты можно считать приближенной оценкой порогового уровня процесса.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-01513А).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
2. *Романов А.Н., Нестеренко Г.И., Филимонова Н.И.* Накопление повреждений при переменном нагружении циклически упрочняющегося материала на стадиях образования и развития трещин // Ж. Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2018. № 5. С. 34.
3. *Zheng X.* A simple Formula for fatigue crack propagation and a new method for the determination of  $\Delta K_{th}$  // Engineering fracture mechanics. 1987. V. 27. № 4. P. 465.
4. *Maierhofer J., Simunek D., Ganser H.P., Pippan R.* Oxide induced crack closure in the near threshold regime: the effect of oxide debris release / International Journal of Fatigue. 2018. V. 117. № 2. P. 21.
5. *Ribeiro A.S., Jesus A.P., Costa J.M., Borrego L.P., Maeiro J.C.* Variable amplitude fatigue crack growth modeling / Mecanica Experimental. 2011. V. 19. P. 33.
6. *Лебединский С.Г., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Поляков А.Н.* Определение эксплуатационной живучести стали литых деталей железнодорожных конструкций // Ж. Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2018. № 6. С. 61.