
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 629.122.004:621.434

АНАЛИЗ ЖИВУЧЕСТИ ЛИТЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2023 г. С. Г. Лебединский^{1,*}, О. В. Бармина¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: slebedinski@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.04.2023 г.

После доработки 25.05.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

Проведено сравнение закономерностей развития усталостной трещины при моделировании эксплуатационного процесса нагружения и расчетной закономерности, по алгоритму линейного суммирования с применением стандартной кинетической диаграммы усталостного разрушения этого же материала. Материал низколегированная сталь тип 20Л. При испытаниях моделировалась нагрузка на криволинейном участке железнодорожного пути. Проведена коррекция параметров исходной кинетической диаграммы усталостного разрушения материала для адаптации ее к расчету при нерегулярном нагружении такого типа.

Ключевые слова: литые железнодорожные детали, литая низколегированная сталь, блок эксплуатационного нагружения, вторичная диаграмма усталостного разрушения

DOI: 10.31857/S0235711923050115, EDN: XAWTZL

В виду того, что процесс развития усталостных трещин при нерегулярных эксплуатационных нагрузках зависит от целого ряда факторов, которые далеко не все изучены [1–3], вопрос прогнозирования достижения прочностного предельного состояния несущих конструкций остается в значительной мере открытым. Исследования характеристик живучести конструкций показывают, что при нерегулярном нагружении усталостное повреждение не определяется линейным суммированием повреждений от отдельных циклов. Следовательно, в задачах прикладного характера необходимы экспериментальные результаты, полученные в условиях близких к эксплуатационным [4]. Природа накопления усталостных повреждений такова, что величина относительного повреждения, будучи по гипотезе линейного суммирования близкая к единице, по экспериментальным результатам имеет пределы от 0.1 до 10.0 [5]. Установлено, что при сохранении статистических параметров спектра нагрузок изменение последовательности циклов существенно влияет на закономерность развития трещины [6]. Тем не менее, во многих лабораториях, следуя нормативным рекомендациям (ASTM E606, E466 и E647, [7]) проводятся испытания при регулярных режимах нагружения.

Наиболее полное представление о закономерностях развития усталостных трещин при нерегулярных процессах нагружения можно найти в работах Р. Сундера [1–3, 8–10]. В модели Р. Сундера выделяется несколько факторов, участвующих в развитии усталостных трещин при эксплуатационном нагружении, и определяется их взаимодействие. Это закрытие трещины, затупление вершины трещины при нерегулярных циклах, возникающие остаточные напряжения вблизи вершины, влияние атмосферных

факторов на механизм разрушения. Одним из основных факторов, определяющих развитие усталостной трещины, Р. Сундер считает локальное напряжение у вершины трещины. Локальное напряжение находится в сложной зависимости от диффузионной кинетики материала. Оно возникает в масштабе нескольких атомных слоев в вершине. Кинетика такого взаимного проникновения, вызывающее “слипание” берегов вершины трещины, сопровождается воздействием атмосферных факторов на вновь образованные поверхности, в ходе развития трещины. А в целом, компонент локального напряжения при вершине трещины обусловлен механикой циклического гистерезиса напряжений, деформацией на вершине трещины и взаимодействием с циклическим влиянием окружающей среды [11]. Относительно области значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН), близкой к пороговому значению, делаются следующие выводы. На ΔK_{th} сильное влияние оказывает атмосферная усталость. Происходит замедление поверхностной диффузии. Но это влияние уменьшается с увеличением компоненты скольжения в механизме разрушения. Результат воздействия атмосферной усталости полностью исчезает при испытаниях в глубоком вакууме [12, 13]. Таким образом, напряжения в области вершины трещины определяют чувствительность к гистерезисной последовательности нагрузок, даже при низком уровне КИН, где преобладают условия близкие к пороговым. То есть, напряжения при вершине трещины чувствительны к циклической последовательности. Отсюда следует, что пороговый уровень КИН ΔK_{th} псевдослучайной последовательности нагрузки может изменяться от цикла к циклу. Значит методика оценки порогового уровня эксплуатационного блока в целом, предложенная в работе [14] для прикладных задач, несет большую информацию, чем пороговое значение, определенное традиционно по стандартной кинетической диаграмме усталостного разрушения (КДУР) материала при гармоническом нагружении.

Учитывая столь сложные на микромасштабном уровне процессы, определяющие развитие усталостных трещин, следует признать, что проведение экспериментального тестирования материалов, при воспроизведении значимых фрагментов эксплуатационного нагружения, становится все более важным.

Проведению экспериментального тестирования помогает создание банков моделей эксплуатационных режимов нагружения, присущих различным отраслям машиностроения, различным условиям эксплуатации, вплоть до отдельных несущих элементов конструкций [15]. Вместе с этим развивается экспериментальная техника, способная воспроизводить нагружение с высокой степенью точности. Такую характеристику, как кинетическая диаграмма усталостного разрушения материала, полученную по стандартным нормативным рекомендациям при гармонических режимах нагружения [7], можно принимать, как основу, определяющую однородную усталостную закономерность, которую имеет исследуемый материал. Отклонения, вызываемые нерегулярным нагружением, воздействием атмосферных, или иных факторов удобно соотносить с кинетической диаграммой усталостного разрушения и рассматривать возможность коррекции параметров исходной КДУР материала. Известны работы по моделированию усталости материалов при нерегулярном нагружении [16, 17]. В них проводилась коррекция стандартных кривых усталости материала (исследовалась усталость без учета развития трещины). Коррекции подлежали предел выносливости и показатель степени кривой усталости. Если эксперимент при нерегулярном процессе нагружения давал несовместимые с исходной кривой усталости результаты, то проводилось построение отдельной, так называемой, вторичной кривой усталости с учетом экспериментально определенных закономерностей.

По такому же алгоритму, только относительно кинетической диаграммы разрушения, выполнена работа, представленная в настоящей статье. В расчетах проведен ана-

лиз экспериментальных результатов работы [14]. В ней предложен метод оценки порогового уровня эксплуатационного нагружения. Особенностью этого метода является то, что снижение уровня эксплуатационного нагружения, для приближения к пороговым условиям осуществляется по мере развития усталостной трещины, т.е. с увеличением податливости образца. Испытание ведется при воспроизведении постоянного блока раскрытия берегов трещины в образце (по методу жесткого нагружения). Такой метод применен, чтобы сохранить подобие процесса нагружения при эксплуатации, но при этом обеспечить постепенное снижение его уровня. Воспроизводился блок нагружения записанный в эксплуатационных условиях при скорости подвижного состава 81.5–90.4 км/час на прямолинейном и криволинейном участках пути. Начальное значение скорости усталостной трещины в эксперименте составило $V = 22.8 \times 10^{-7}$ м/блок. При испытаниях, для определения изменений соотношений экстремумов циклов велась запись отработанных сигналов, как с канала нагрузки, так и с канала экстензометра. Это соотносилось с изменением длины трещины и числом отработанных блоков. При испытании использовался стандартный образец типа С(Т) (внецентренное растяжение) (ГОСТ 25.506-85) с размерами $125 \times 120 \times 10$ мм. Образец вырезан из литой надрессорной балки грузового вагона [18]. Материал образца низколегированная сталь (тип 20Л). Химический состав стали: С – 0.2104; Mn – 1.085; Si – 0.292; P < 0.003; S – 0.020; Cr – 0.108; Ni – 0.13; Cu – 0.215; V < 0.0030; Fe – 97.91. С числом отработанных блоков и ростом трещины фиксировались закономерности снижения нагрузки ΔP и изменение, при этом, скорости развития трещины V . За начало отсчета величины снижения нагрузки выбрана максимальная величина в первом отработанном блоке P_{\max} . Далее отслеживалось изменение этой величины с ростом трещины. При анализе результатов, выявлено, что с ростом трещины соотношение максимального и минимального значений циклов нагружения, относительно исходного процесса, меняется с коэффициентом подобия KP для всех циклов блока. Коэффициент асимметрии R для каждого цикла остается постоянным с изменением длины трещины, при этом средняя величина нагрузки снижается.

Таким образом, коэффициентом подобия является величина

$$KP_i = (P_{\max} - \sum \Delta P_i) / P_{\max},$$

где KP_i – соответствует длине трещины L_i ; P_{\max} – максимальное значение нагрузки в первом (исходном) блоке, когда трещина еще не продвинулась; $\sum \Delta P_i$ – суммарное снижение величины P_{\max} . Таким образом, произведение коэффициента KP_i на все экстремумы циклов нагрузки исходного блока определяет блок нагрузки при длине трещины L_i в образце С(Т). На рис. 1 представлена зависимость коэффициента подобия $KP(L)$ от суммарного увеличения длины трещины $L = 42 + \sum \Delta L$, т.е. при ее исходном значении $L = 42$ мм от линии приложения нагрузки, и изменение скорости роста трещины от числа блоков нагружения.

Уравнение квадратичной аппроксимации (рис. 1а, кривая 1) имеет вид

$$KP(L) = -0.00393(L)^2 + 0.2996L - 4.664. \quad (1)$$

Эта зависимость использовалась для определения эксплуатационной нагрузки по мере изменения длины трещины.

Эксперимент, с эксплуатационным процессом нагружения проводился при росте трещины от длины $L_0 = 42$ мм до $L = 46.69$ мм, при этом было отработано 2857 блоков нагружения. Каждый блок состоит из 325 циклов. Для сравнения закономерности раз-

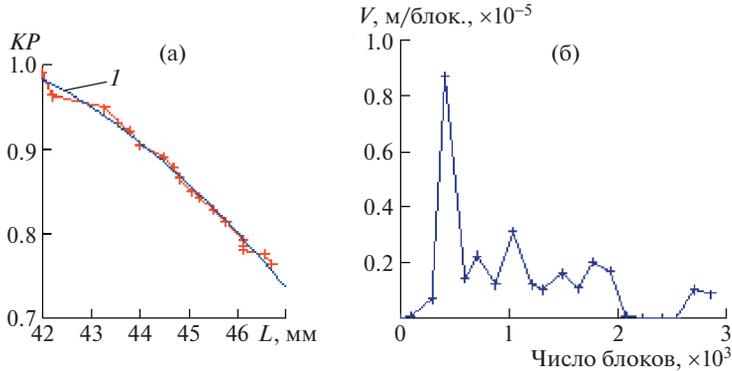


Рис. 1. (а) – коэффициент подобия, в зависимости от длины трещины L : I – аппроксимирующая зависимость, точки – экспериментальные значения; (б) – изменение скорости роста трещины на интервале ее длины $L = 42\text{--}46.69$ мм, от числа блоков нагружения.

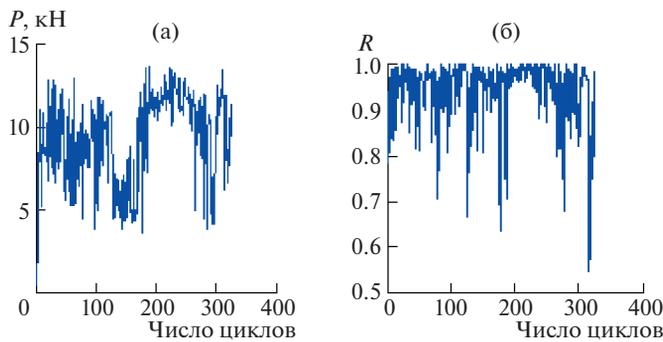


Рис. 2. (а) – блок процесса нагружения, после выделения полных циклов; (б) – коэффициенты асимметрии R каждого цикла.

вития трещины, которое определяется стандартной КДУР, использовались результаты работы [18]. Диаграмма для той же марки стали (тип 20Л) принята в виде уравнения

$$V(\Delta K) = \frac{V_0 [\Delta K - K_{th}(1 - R)^\alpha]^n}{[K_{fc}(1 - R) - \Delta K]^n}, \quad \text{м/цикл-МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (2)$$

где параметры $\alpha(R) = 0.846 - 0.37R$; $V_0(R) = 10^{-(1.565 + 4.04R)}$; $n(R) = 2.735 - 2.17R$; $K_{fc} = 105 \text{ МПа } \sqrt{\text{м}}$; $K_{th} = 12.23 \text{ МПа } \sqrt{\text{м}}$, (при $R = 0$).

Алгоритм расчета. Для расчета длительности развития трещины с использованием уравнения (2) применен известный алгоритм линейного суммирования повреждений за каждый цикл из блока эксплуатационного нагружения. Для этого эксплуатационный блок нагрузок подвергнут схематизации для выделения полных циклов [ГОСТ 25.101-83]. В результате определены последовательности значений амплитуд циклов и ко-

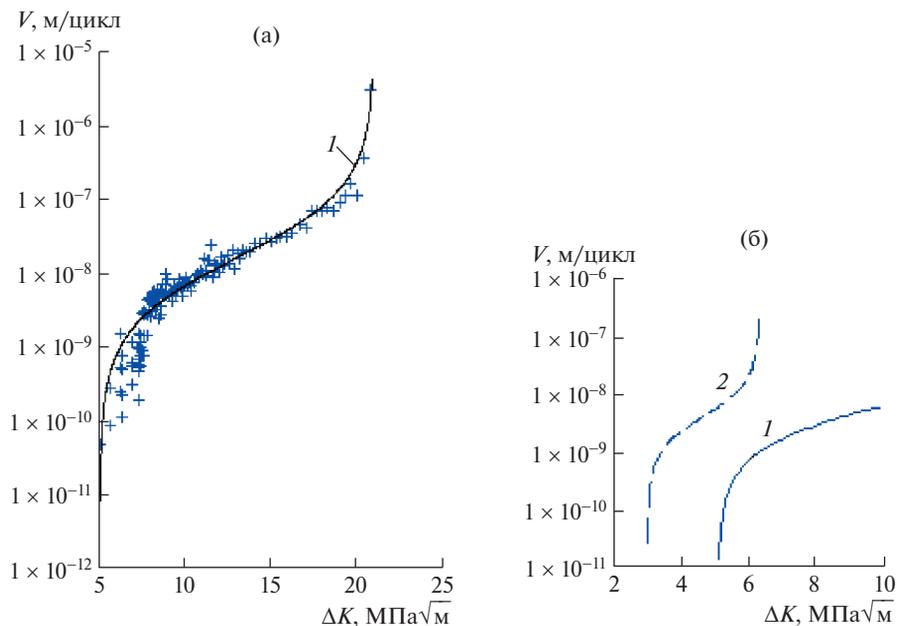


Рис. 3. Кинетические диаграммы усталостного разрушения: (а) – стандартная КДУР стали 20ГФЛ: 1 – аппроксимация по уравнению (2), точки – эксперимент; (б) – расчетные фрагменты КДУР: 1 – при $R = 0.8$; 2 – для $R = 0.94$, уравнение (2).

эффиценты асимметрии, соответствующие каждому циклу. Они показаны на рис. 2а, б соответственно.

Далее, обращаясь к зависимости, определяющей коэффициент интенсивности напряжений для заданной длины трещины в компактном образце [7], находилась амплитуда КИН и по КДУР, выражаемая уравнением (2) для каждого цикла найдена величина подрастания трещины.

Перед расчетом увеличения трещины от последующего блока, определялся процесс нагружения, соответствующий измененной длине трещины. Это достигалось умножением всех экстремумов на коэффициент подобия (1). Общая закономерность роста трещины находилась суммированием поциклового подрастания. Использованная модель процесса нагружения по значениям коэффициентов асимметрии имеет высокий уровень, что соответствует высокой загруженности транспорта. Среднее значение, после выделения полных циклов, составило $R = 0.94$. Величины R циклов в схематизированном блоке представлены на рис. 2б. Экспериментально уравнение КДУР, использованное в расчете, найдено при наибольшем значении $R = 0.8$. Для более высоких величин R скорость V вычислялась по зависимостям, входящих в определение коэффициентов уравнения (2). То есть, проведена в определенной степени экстраполяция на более высокие значения R . На рис. 3 показаны кинетические диаграммы усталостного разрушения: экспериментальная (точки), при $R = 0.8$, и ее аппроксимация по уравнению (2) и, для сравнения, расчетная зависимость для $R = 0.94$ (средней величины эксплуатационного процесса нагружения) (рис. 3б).

На рис. 4а показана расчетная зависимость длины трещины от числа блоков нагружения. Она определена с использованием КДУР, выраженной уравнением (2). Величина подрастания трещины за общее число отработанных блоков 2857 (по 325 циклов

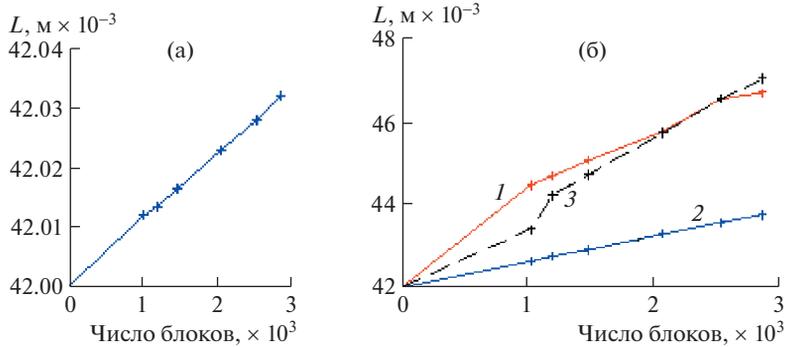


Рис. 4. Зависимости роста усталостной трещины от числа эксплуатационных блоков нагружения: (а) – расчетная, с использованием КДУР; (б): 1 – экспериментальная, 2 – при использовании КДУР с пороговым значением $\Delta K_{th} = 0$, 3 – при скорректированной КДУР: $\Delta K_{th} = 0$ и $V_0 = 10^{-(1.088 + 4.04R)}$ в уравнении (2).

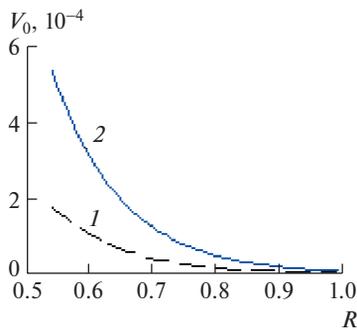


Рис. 5. Зависимости параметра V_0 в уравнении (2) от коэффициента асимметрии R : 1 – исходная зависимость параметра V_0 , при гармоническом нагружении; 2 – скорректированная зависимость.

в каждом блоке) составила 0.032 мм. В эксперименте, за то же число блоков, увеличение длины трещины составило 4.69 мм. То есть, по расчетной зависимости, с использованием КДУР, трещина должна развиваться значительно медленнее. Первую поправку, которую можно сделать, это считать все циклы в расчете действующими. То есть принять пороговый уровень в КДУР уравнения (2), равным нулю $\Delta K_{th} = 0$. Результат расчета с такой поправкой показан на рис. 4б, кривая 2. Сравнивая расчетную и экспериментальную зависимости (рис. 4б, кривая 1, 2) видно, что такой поправки не достаточно.

Учитывая, что эксплуатационный процесс нагружения состоит из циклов с высоким коэффициентом асимметрии R (рис. 2б), а верхний предел экспериментальной апробации уравнения (2) проводился только при $R = 0.8$, можно ввести поправку в зависимость $V_0(R)$: $V_0(R) = 10^{-(1.565 + 4.04R)}$ и получить зависимость $V_0(R) = 10^{-(1.088 + 4.04R)}$. При таких двух совместных коррекциях получается расчетная зависимость длины трещины от числа эксплуатационных блоков нагружения (рис. 4б, кривая 3), близкая к

экспериментальной. На рис. 5 показаны зависимости параметра V_0 в уравнении (2) от коэффициента асимметрии R .

Выводы. 1. Предложен и апробирован метод тестирования материалов при моделировании эксплуатационного процесса со снижением среднего уровня и сохранением его подобия. Такой метод позволяет получить как оценку порогового уровня процесса [14], так и выявить особенности накопления повреждений, связанных с нерегулярностью циклических нагрузок. 2. Экспериментальная закономерность развития усталостной трещины при моделировании нагрузки на криволинейном участке железнодорожного пути существенно отличается от результата расчета с использованием стандартной КДУР материала. Различие показывает более быстрый рост трещины, при эксплуатационном процессе нагружения. 3. Для сближения этих закономерностей предложена коррекция стандартной КДУР материала со снижением до нуля порогового уровня КИН ΔK_{th} и введением более сильной зависимости параметра V_0 в уравнении (2) КДУР от коэффициента асимметрии R (рис. 5). То есть в расчете развития усталостных трещин, при эксплуатационном процессе данного типа предлагается использовать зависимость $V_0(R) = 10^{-(1.088 + 4.04R)}$, вместо $V_0(R) = 10^{-(1.565 + 4.04R)}$ уравнения (2) стандартной КДУР. Что дает закономерность развития трещины близкую к экспериментальной.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sunder R.* Fatigue crack growth as a consequence of environment-enhanced brittle micro fracture // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 2005. V. 28 (3). P. 289.
2. *Sunder R.* Unraveling the Science of Variable-Amplitude Fatigue // *Journal of ASTM International.* 2012. V. 9. № 1. P. 20.
3. *Sunder R., Porter W.J., Ashbaugh N.E.* The Role of Air in Fatigue Load Interaction // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2003. V. 26. P. 1.
4. *Gassner E.* Strength experiments under cyclic loading in aircraft structures // *Luftwissen.* 1939. V. 6 (61–4) [in German].
5. *Schuetz W.* A History of Fatigue. Berlin: DVM, 2008. 40 p.
6. *Schijve J.* Observations on the prediction of fatigue crack growth propagation under variable amplitude loading // In: *ASTM Special Technical Publications. Physics*, 1976. P. 3. <https://doi.org/10.1520/STP33360S>
7. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Методические указания. РД 50-345-82. М.: Изд-во стандартов, 1983.
8. *Sunder R.* Fractographic Reassessment of the Significance of Fatigue Crack Closure / Eds. J. Newman, K.-H. Schwalbe // *J. ASTM International.* 2005. V. 2 (6). 18 p. <https://doi.org/10.1520/JAI12003>
9. *Sunder R.* On the hysteretic nature of variable-amplitude fatigue crack growth // *Int. J. Fatigue.* 2005. V. 27. P. 1494.
10. *Sunder R., Andronik A., Biakov A., Eremin E., Panin S., Savkin A.* Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic Analysis // *Int. J. Fatigue.* 2016. V. 82. P. 667.
11. *Sunder R.* Fatigue crack growth as a consequence of environment-enhanced brittle micro fracture // *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 2005. V. 28 (3). P. 289.
12. *Sunder R., Porter W.J., Ashbaugh N.E.* The Role of Air in Fatigue Load Interaction // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2003. V. 26. P. 1.
13. *Sunder R.* Contribution of Individual Spectrum Cycles to Damage in Notch Crack Initiation / Eds. M.R. Mitchell and R.W. Landgraf // *ASTM STP 1211, Short and Long Cracks.* 1993. P. 19.

14. *Лебединский С.Г., Москвитин Г.В.* Оценка эксплуатационного порогового уровня нагружения для литых железнодорожных сталей // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 1. С. 28.
https://doi.org/10.52261/02346206_2021_1_28
15. *Heuler P., Klättschke H.* Generation and Use of Standardised Load Spectra and Load-Time Histories // International Journal of Fatigue. 2005. V. 27. (8). P. 974.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.09.012>
16. *Козлов Л.А., Серенсен С.В.* Прочность при нестационарных режимах нагрузки. Гл. V. Киев: Изд-во Академии наук УССР, 1960. 295 с.
17. *Кобаев В.П.* Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.
18. *Лебединский С.Г., Змеева В.Н.* Закономерности развития усталостных трещин в литых сталях железнодорожных конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2000. № 3. С. 98.