

УДК 621.182:539.219

**ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ
ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПАРОГЕНЕРАТОРОВ И ПАРОВЫХ КОТЛОВ**А.А. Макеев, Л.Л. Любимова, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко,
А.А. ТашлыковТомский политехнический университет
E-mail: lll@tpu.ru

На основе рентгенометрии установлены закономерности возникновения труднообнаруживаемых экспериментально микроусталостных трещин, в условиях роста которых реализуется основной ресурс оборудования, и макротрещины как достижения предельного состояния поверхности нагрева при усталости.

Ключевые слова:

Усталость, кривые усталости, малоцикловая усталость, многоцикловая усталость, микроструктурно короткие трещины, макроскопические усталостные трещины, ресурс.

Введение

Жаропрочные нержавеющие аустенитные хромоникелевые стали нашли широкое применение в энергомашиностроении. В настоящее время разработано большое количество различных марок сталей этого типа, таких как 0X18H10, 08X18H10T, 1X18H10T, 0X18H12B, X15H35B3T3ЮP и т. д. Опыт эксплуатации показал, что в наибольшей степени требованиям жаропрочности, коррозионной устойчивости и механической прочности отвечают стали 08X18H10T. Из нержавеющей стали 08X18H10T в том числе изготавливаются оболочки твэлов, являющиеся барьером безопасности между ядерным горючим и теплоносителем, трубные пучки парогенераторов (ПГ), часто коллекторы парогенераторов, или коллекторы с плакировкой из нержавеющей стали, дистанционирующие элементы змеевиков трубного пучка, теплообменники, трубопроводы главного циркуляционного контура, связывающие между собой основное оборудование первого контура – реактор, парогенераторы, ГЦН и другие ответственные узлы первого и второго контуров АЭС [1].

Однако при эксплуатации обнаруживается склонность нержавеющих сталей к таким специфическим видам повреждений, как высокотемпературное упрочнение и охрупчивание, радиационное распухание, снижающие радиационную стойкость сталей, коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), проявляемое в виде транскристаллитного растрескивания металла через тело зерна, и межкристаллитная коррозия (МКК). Наблюдаются течи из первого контура во второй из-за повреждений теплообменных трубок и коллекторов, а также из-за неплотностей, возникающих в швах обварки трубных пучков [2].

Любимова Людмила Леонидовна, канд. техн. наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ.

E-mail: lll@tpu.ru

Область научных интересов: оценка работоспособности труб поверхностей нагрева энергетического оборудования на основе рентгенодиалометрии.

Макеев Анатолий Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ.

E-mail: lll@tpu.ru

Область научных интересов: диагностика и надежность работы энергетического оборудования.

Заворин Александр Сергеевич, д-р техн. наук, зав. кафедрой парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ

E-mail: zavorin@tpu.ru

Область научных интересов: энергетические технологии топливосжигания, теплофизические процессы в трактах котельных установок, диагностика и надежность работы энергетического оборудования.

Ташлыков Александр Анатольевич, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ.

E-mail: tashlykov@tpu.ru

Область научных интересов: диагностика и надежность работы энергетического оборудования.

Фисенко Роман Николаевич, инженер кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института ТПУ.
E-mail: ronifis@sibmail.com
Область научных интересов: диагностика и надежность работы энергетического оборудования.

Статистика трубных дефектов показывает, что по причине КРН и МКК трубного пучка замена ПГ на зарубежных АЭС за 10 лет эксплуатации становится необходимой для 20 % ПГ задолго до исчерпания их проектного ресурса. Повреждения труб в результате КРН и МКК составляют порядка 31 % от общего числа трубных дефектов [2].

Разгерметизация оболочек твэлов с возникновением микротрещин с дефектами типа газовой неплотности или дефектов, при которых имеет место прямой контакт ядерного топлива с теплоносителем, протечки радиоактивного теплоносителя во второй контур АЭС с реактором ВВЭР, не имеющий биологической защиты, снижая концентрацию борной кислоты первого контура, могут привести к ядерно-опасному режиму работы реакторной установки. По условиям герметичности все соединения труб с оборудованием и арматурой выполнены

сваркой, в результате чего высокий нагрев металла в зонах шва и термического влияния сварки приводит к неконтролируемым структурно-фазовым превращениям, способным изменить служебные ресурсные прочностные характеристики стальных труб. Нержавеющие стали не всегда структурно стабильны, что изменяет их свойства в процессе эксплуатации.

К факторам эксплуатационного воздействия, влияющим на работоспособность трубопроводов пароводяного тракта котлов, относятся не только статические напряжения от внутреннего давления, но и длительно действующие циклически изменяющиеся напряжения и деформации. Они возникают при пусках, остановах, резких изменениях режимов, которые приводят к изменению структуры материала и его состояния, влияют на механические свойства и, следовательно, на ресурс. Процесс разрушения материала под действием циклических напряжений получил название усталости. Опасность усталостных разрушений заключается в том, что циклические деформирования более резко и неблагоприятно сказываются на прочности неоднородных микроструктур; кроме того, усталостные разрушения протекают при напряжениях ниже пределов прочности, упругости и текучести [3].

Состояние проблемы

Проблема усталости существует более 150 лет. В результате интенсивных исследований, проведенных материаловедами, химиками, математиками, физиками, к настоящему времени было достигнуто лишь только более глубокое понимание самой проблемы, связанной с влиянием микроструктуры, коррозионной среды, размера зерна, уровня приложенных напряжений, концентраторов напряжений, температуры и т. д. на закономерности и скорость роста усталостных трещин [4].

Академик Ю.Н. Работнов [5] выразил мнение, что проблема разрушения – это центральная проблема учения о сопротивлении материалов. Но «механика разрушения» как самостоятельная ветвь механики деформируемого твердого тела возникла совсем недавно, границы этой новой научной дисциплины еще не определились, однако необходимость объединения усилий представителей разных наук (механиков, физиков, физиков-химиков) для решения проблемы разрушения осознана и признана всеми. Под «механикой разрушения» в настоящее время понимается изучение тех условий, при которых в теле развивается система трещин, или макротрещина, как предельное состояние при усталости.

Количественно усталостный процесс принято описывать кривыми усталости – зависимостью между накопленным повреждением и числом циклов. Различают кривые усталости в области малоциклового усталости (число циклов нагружения менее 10^4), в области многоциклового усталости (при разрушающем числе циклов более 10^5), а также в области невысоких и высоких температур. Существует две стадии усталости [6]:

- на первой стадии происходит возникновение и накопление необратимых деформаций, что заканчивается зарождением макротрещины. Это проявляется в виде изменения плотности дислокаций и концентрации вакансий, твердости, плотности, электрического, магнитного, акустического сопротивления и т. д.;
- на второй стадии накопление повреждения оценивается скоростью прорастания макротрещины и уменьшением сопротивления материала хрупкому разрушению.

При этом пределом выносливости, т. е. способности металла противостоять процессу усталости, называют наименьшее напряжение, при котором трещина распространяется до разрушения. Очевидно, что предел выносливости определяется тем напряжением, которое требуется для преодоления трещиной самого высокого барьера микроструктуры.

Различают микроструктурно короткие ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ мм), физически короткие и макроскопические трещины [4, 7]. Возникающие при циклических нагрузках повреждения постепенно переходят в субмикроскопические трещины, которые, объединяясь, образуют макроскопическую усталостную трещину длиной 0,1...0,5 мм. «Обычно усталостные трещины очень трудно обнаружить при их зарождении и в процессе развития до критических размеров» [3].

Долгое время количественная оценка скорости распространения усталостных трещин не поддавалась изучению. Отмечается [4], что различие в механизмах микро- и макромеханики разрушения приблизит в целом к пониманию процесса усталостного разрушения. Для макротрещины все задачи решаются в настоящее время в рамках линейно-упругой механики разрушений, основанной на приближении сплошности, однородности и изотропности упругой среды. В случае высоких уровней циклических нагрузок, когда у вершины трещины возникают пластические деформации, эти методы неадекватны, необходимы иные подходы упругопластической механики разрушения. Академик Ю.Н. Работнов [5] отмечает, что способность трещины к дальнейшему продвижению определяется единственной характеристикой – работой на единицу длины пути, или критическим коэффициентом интенсивности. Этот коэффициент интенсивности играет для всей теории фундаментальную роль, т. к. после этого количественная оценка скорости распространения так называемых длинных трещин усталости, анализ роста которых возможен в рамках линейно-упругой механики разрушения, может быть дана выражением [4]:

$$da / dN = D \Delta K^n, \quad (1)$$

где D и n – постоянные материала; ΔK – размах коэффициента интенсивности деформаций; a – длина трещины; N – число циклов нагружения.

Аналогичное выражение Пэриса Эрдогана имеет вид [7]:

$$dl / dN = c(\Delta K_I)^n, \quad (2)$$

где l – длина трещины; $\Delta K_I = K_{I_{\max}} - K_{I_{\min}}$ – изменение коэффициента интенсивности напряжений в цикле; $K_{I_{\max}}$ и $K_{I_{\min}}$ – наибольшее и наименьшее значение коэффициента интенсивности напряжений за цикл; n и c – константы материала.

Интегрирование (1, 2) дает долговечность изделия, под которой понимается число циклов, необходимое для подрастания трещины до критических размеров [7]:

$$N_c = \frac{2}{\pi^{n/2}(n-2)c\Delta\sigma^n B^n} \left(l_n^{(2-n)/2} - l_c^{(2-n)/2} \right). \quad (3)$$

Отмечается [7], что применение формулы (3) затрудняется тем, что параметры c и n не являются функциями материала.

На основании (1, 2) получено еще несколько решений, например [8]. Но они, как и (3), имеют ограниченное применение.

Кроме того, важно отметить невоспроизводимость экспериментальных результатов и их большой разброс по сравнению с теорией.

Несколько иначе дело обстоит с короткими трещинами.

Рост микроструктурно коротких трещин следует рассматривать с позиций деформационного подхода. Рост таких трещин определяется [4]:

$$da/dN = A\Delta\gamma_p^\alpha (d-a),$$

где A и α – постоянные материала; d – размер самого прочного барьера; a – длина трещины; $\Delta\gamma_p^\alpha$ – размах пластической сдвиговой деформации.

Для роста физически коротких трещин, имеющих тенденцию ускоренного развития, справедливо [4]:

$$da/dN = B\Delta\gamma_p^\beta a - c, \quad (4)$$

где B и β – постоянные материала; c – характеризует пороговое условие перехода от микро-структурных трещин к более длинной трещине.

В работе [9] на основании (4) с существенными допущениями (влиянием трещин друг на друга пренебрегается, вероятность зарождения микротрещин одинакова везде на поверхности материала, параметр c в выражении (4) не учитывается и т. д.) получено выражение для средней длины трещин к моменту времени t :

$$a = \frac{a_o \exp(\alpha\Delta\gamma^m T)}{T\alpha\Delta\gamma^m},$$

и суммарной длины трещины:

$$a_s = \frac{a_o \exp(\alpha\Delta\gamma^m T)\mu}{\alpha\Delta\gamma^m},$$

где a_o – размер начальной трещины, который полагают равным 3 мкм.

Долговечность рассчитывается по выражению:

$$\tau = T(k) + \frac{a_c^{(2-m)/2} - a_o^{(2-m)/2}}{[(2-m)/2]\alpha\Delta\gamma^m \pi \frac{m}{2}},$$

где второе слагаемое правой части получено интегрированием уравнения Пэриса, а $T(k)$ – время, необходимое для образования магистральной трещины.

Чтобы воспользоваться результатами предложенной модели, надо экспериментально получить по очень трудоемкой и сложной процедуре испытаний ряд параметров усталостного разрушения – среднюю скорость зарождения микротрещин, средние по ансамблю постоянные законы роста микротрещин и постоянные уравнения роста магистральных трещин [9].

Как отмечается в [4], все классические работы по вопросам сопротивления усталости за последние 100 лет «должны быть пересмотрены с позиции механики коротких трещин», все факторы – коррозионная среда, размер зерна, твердость, пределы прочности и текучести, остаточные напряжения – «должны быть проанализированы с точки зрения их влияния на закономерности роста коротких трещин».

Это связано с тем, что такой анализ и знание закономерностей накопления повреждаемости на начальных стадиях представляют большой не только научный, но и практический интерес, так как основной ресурс оборудования реализуется в условиях роста микро-структурно коротких трещин, на который приходится 80...90 % долговечности. Оставшиеся 10...20 % оп-ределяются ростом магистральной трещины вплоть до окончательного разрушения [9].

Теория усталости в настоящее время отсутствует, поэтому обычно говорят не о ней, а гипотезах или закономерностях усталостного разрушения [3].

Механика разрушения сводится к изучению условий, при которых в структуре материала будет развиваться трещина или система трещин. Таким образом, определены три вида усталостных трещин. Рост каждой из таких трещин, их количественный анализ не может производиться с единых позиций, а требует использования своего отдельного раздела механики разрушения.

Разрушение при циклическом деформировании представляется возникновением микро-повреждений, их накоплением, образованием микротрещин, их слиянием в макротрещины, что приводит к окончательной потере прочности. В этой связи актуальными остаются эксперимен-тальные подходы по установлению предельного состояния структуры материала, приводящего к разрушению.

Экспериментальная часть

В настоящей работе в качестве экспериментального применен образец в виде шлифа размером $20 \times 20 \times 2$ мм из сертифицированной стали 08X18H10T промышленной плавки Г-45704 с концентрацией компонент: Cr – 17,91 %; Ni – 10,2 %; Mn – 0,33 %; Si – 1 %; Ti – 0,48 %; V – 0,17 %; Mo – 0,16 %; Cu – 0,25 %; C – 0,08 %; P – 0,03 %; S – 0,02 %.

Плосконапряженное состояние создавалось циклическим деформированием исследуемого образца с применением гидравлического пресса при фиксированном значении внешнего давления. После каждого цикла нагружения производилось рентгенографирование наружной и внутренней поверхностей исследуемого образца с использованием медного монохроматизированного излучения трубки с длиной волны $\lambda_{\text{кв}} = 1,39217 \text{ \AA}$. Полученные значения внутренних напряжений, плотности дислокаций и размеров кристаллитов образца стали 08X18H10T от величины приложенного внешнего давления представлены на рис. 1, 2.

Согласно известному энергетическому критерию А.А. Гриффитса разрушение произойдет тогда, когда при малом удлинении будет выделяться больше упругой энергии, чем требуется для удельной энергии образования новых поверхностей. Иными словами, поверхностная энергия должна быть меньше освобождающейся упругой энергии.

В этой связи релаксацию внутренних напряжений, при которой высвобождается энергия, можно связать с развитием трещины. При этом чем больше глубина релаксации, тем больше высвобождается энергии, тем сильнее продвигается трещина.

Если трещина при релаксации превосходит несколько размеров диаметра структурного зерна, значит, межзеренные границы уже не являются барьером для их продвижения и далее разрушение может происходить самопроизвольно (лавинно).

Для оценки разрушения зерна в ходе холодного деформирования образца используется формула Котрелла, приведенная в [10], с помощью которой можно оценить длину зональной трещины $l_{\text{зон}}$, зависящей от внутренних напряжений первого рода σ_I и длину интеркристаллитной трещины L , зависящей от внутренних микронапряжений второго рода σ_{II} :

$$L = \frac{2 \cdot \gamma \cdot G}{\pi \cdot (1 - \mu) \cdot \sigma_n^2},$$

где γ – поверхностная энергия, МПа·см; $\gamma = 0,1Gb$, где $b = 2,48 \cdot 10^{-8}$ – диаметр атома железа, см; $G = 8 \cdot 10^4$ – модуль сдвига, МПа; $\mu = 0,27$ – коэффициент Пуассона; σ_n – остаточные после каждого деформирования напряжения, МПа.

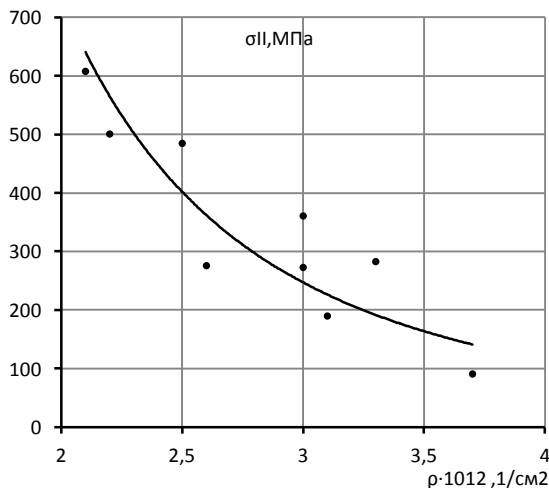


Рис. 1. Влияние циклического нагружения на распределение внутренних напряжений σ_{II} в зависимости от плотности дислокаций ρ . Сталь 08X18H10T (наружная сторона)

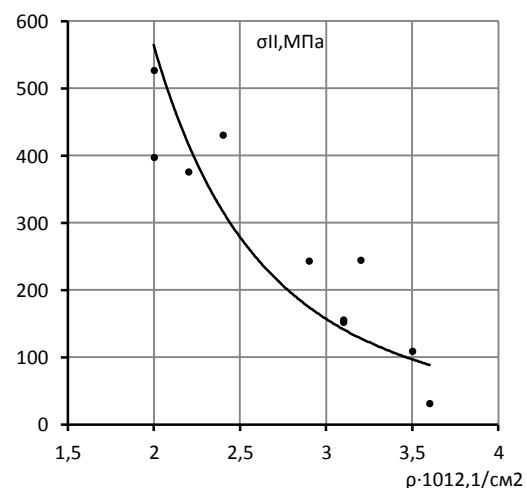


Рис. 2. Влияние циклического нагружения на распределение внутренних напряжений σ_{II} в зависимости от плотности дислокаций ρ . Сталь 08X18H10T (внутренняя сторона)

Значения длины кристаллитных и зональных трещин в зависимости от внешней нагрузки и стороны образца представлены на рис. 3–6.

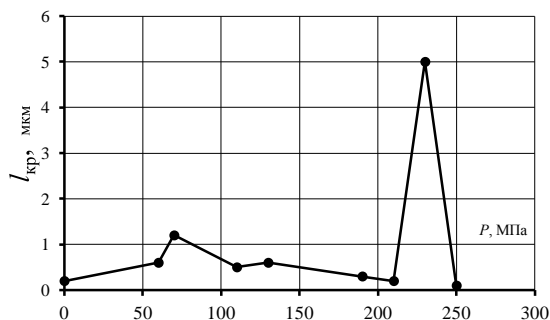


Рис. 3. Зависимость длины кристаллитной трещины $l_{кр}$ от внешней нагрузки в образце трубы из стали 08X18H10T (наружная сторона)

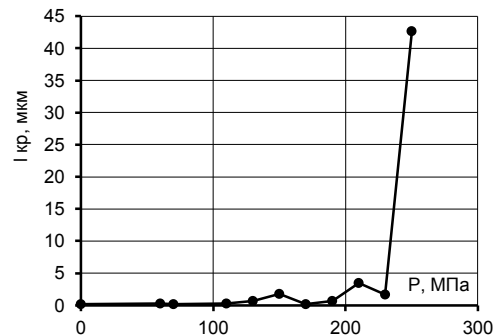


Рис. 4. Зависимость длины кристаллитной трещины $l_{кр}$ от внешней нагрузки в образце трубы из стали 08X18H10T (внутренняя сторона)

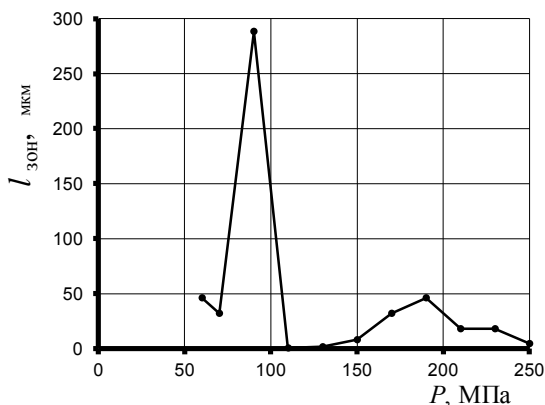


Рис. 5. Зависимость длины зональной трещины $l_{зон}$ от внешней нагрузки в образце трубы из стали 08X18H10T (наружная сторона)

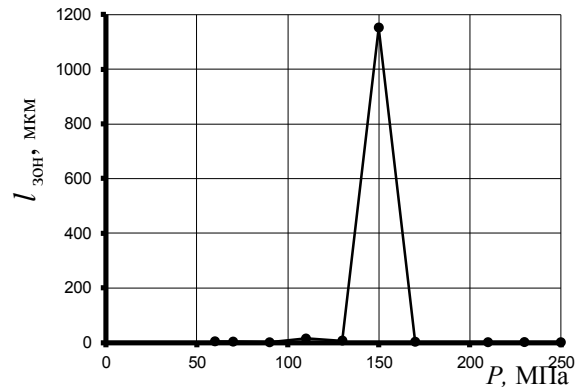


Рис. 6. Зависимость длины зональной трещины $l_{зон}$ от внешней нагрузки в образце трубы из стали 08X18H10T (внутренняя сторона)

Выводы

Таким образом, механоциклическими испытаниями достигнуто следующее:

1. Установлены количественные кривые зависимости внутренних напряжений от плотности дислокаций, подтверждающие качественную гипотезу Одинга–Бочвара – сопротивление деформированию от плотности дислокаций (рис. 1, 2). Как и на гипотетических кривых Одинга–Бочвара, любая точка на экспериментальной зависимости характеризует реальную прочность материала и его текущее физическое состояние.
2. Установлены внутренние напряжения, определяющие реальную прочность и соответствующие σ_v , которые могут быть определены из рис. 1 и 2 по левому верхнему положению на кривых зависимостей σ_{II} – плотность структурных дефектов:
 - для наружной поверхности трубы – $\sigma_v = 608$ МПа, рис. 1;
 - для внутренней поверхности трубы – $\sigma_v = 526$ МПа, рис. 2.
3. Установлен условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, величина которого соответствует напряжениям релаксации и составляет:
 - для наружной поверхности трубы – $\sigma_{0,2} = 210$ МПа, рис. 3;
 - для внутренней поверхности трубы – $\sigma_{0,2} = 230$ МПа, рис. 4.

4. По этим данным установлено критериальное отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_b$, характеризующее склонность к хрупким разрушениям:

- для наружной поверхности трубы – $\sigma_{0,2}/\sigma_b = 210/608 = 0,40$ (рис. 1, 3);
- для внутренней поверхности трубы – $\sigma_{0,2}/\sigma_b = 230/526 = 0,44$ (рис. 2, 4).

Эти результаты показывают, что наружная и внутренняя поверхности не склонны к процессам охрупчивания.

5. Установлен предел выносливости σ_{-1} – им может считаться наименьшее напряжение, при котором образовалась первая большая трещина:

Для межзеренных границ:

- для наружной поверхности трубы $\sigma_{-1} = 90$ МПа (рис. 5);
- для внутренней поверхности трубы $\sigma_{-1} = 150$ МПа (рис. 6).

Для зерен:

- для наружной поверхности трубы $\sigma_{-1} = 210$ МПа (рис. 3);
- для внутренней поверхности трубы $\sigma_{-1} = 230$ МПа (рис. 4).

Эти результаты показывают, что исследуемый материал в большей степени проявляет склонность к разрушениям по границам зерен.

6. Становится возможным оценивать прочность зерен и прочность межзеренных границ реального материала, определяющую индивидуальный ресурс стали теплопередающих поверхностей.

Работа поддержана грантом РФФИ № 11-08-00782а (№ 012011598308) в 2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструкционные материалы ядерных реакторов: в 2 ч. – Ч. II. Структура, свойства, назначение / под общей ред. Н.М. Бескоровайного. – М.: Атомиздат, 1977. – 256 с.
2. Смыков В.Б. Коррозионные проблемы эксплуатации парогенераторов ЯЭУ. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1985. – 61 с.
3. Смирнов А.Н., Герике Б.Л., Муравьев В.В. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.
4. Миллер К.Ж. Усталость металлов – прошлое, настоящее и будущее // Заводская лаборатория. – 1994. – № 3. – С. 31–44.
5. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1974. – 416 с.
6. Серенсен С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. – М.: 1975. – 192 с.
7. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1984. – 224 с.
8. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
9. Петерсен Т.Б., Ботвина Л.Р. Статистическая модель накопления повреждаемости в металлах при циклических нагружениях // Заводская лаборатория. – 1993. – № 1. – С. 39–42.
10. Иванова В.С., Гордиенко А.К., Геминев В.И. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов. – М.: Металлургия, 1991. – 383 с.

Поступила 20.09.2013 г.