

12. Ohira T. Quantitative characterization of microcracking in A533B steel by acoustic emission / T. Ohira, Y.-H. Pao // Ibid. – 1989. – Vol. 20A. – P. 1105–1114.
13. Gries H. Results of acoustic emission during mechanical and thermal loadings of vessel components and their fracture mechanical interpretation / H. Gries, E. Waschki // Nuclear Engineering and Design. – 1988. – Vol. 106. – P. 399–403.
14. ДСТУ 4227-2003. Рекомендації щодо акустико-емісійного контролю об'єктів підвищеної небезпеки. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 25 с.
15. Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. посібник / З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – К.: Наук. думка, 2009. – 877 с.
16. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 38 с.
17. Смирнов В. И. Об оценке размеров дефектов методом акустической эмиссии с позиции линейной механики разрушения / В. И. Смирнов // Дефектоскопия. – 1979. – № 2. – С. 45–50.
18. Коровкин Е. Д. Определение старта трещины акустическим методом / Е. Д. Коровкин, А. В. Скоболо, Л. П. Дунина // Завод. лаборатория. – 1980. – № 9. – С. 865–867.
19. Determination of threshold values of stress intensity factor using acoustic emission method / O. Ye. Andreykiv, M. V. Lysak et al. // Proc. 18-th Symp. Experimental Mechanics of Solids (Jachranka near Warsaw, Poland, 14–16 October 1998). – Warsaw, 1998. – P. 114–119.
20. Скальський В. Р. Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії / В. Р. Скальський, О. Є. Андрейків. – Львів: В-во Львів нац. ун-ту ім. І. Франка, 2006. – 330 с.

Надійшла до редакції
10.11.12

УДК 539.3

Ю. В. Ромашов, канд. техн. наук

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
(г. Харьков, e-mail: romashov_yu_v@ukr.net)

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТИНУАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Рассматривается оценка долговечности элементов конструкций энергетического оборудования на основе континуальной механики разрушения. Предложено подход к определению показателей долговечности: гамма-процентного и среднего ресурса с учетом разброса условий эксплуатации энергетического оборудования. Представлена обобщенная формулировка и численное решение методом Бубнова–Галеркина задач континуальной механики разрушения, которое необходимо для определения показателей долговечности. В качестве примера использования предложенных подходов рассмотрено определение показателей долговечности для теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов в условиях ползучести и коррозионного растрескивания. Показано, что оценка долговечности по среднему ресурсу может оказаться завышенной, поэтому наиболее полным показателем долговечности является гамма-процентный ресурс.

Розглядається оцінка довговічності елементів конструкцій енергетичного обладнання на основі континуальної механіки руйнування. Запропоновано підхід щодо визначення показників довговічності: гама-відсоткового та середнього ресурсу з урахуванням вірогідного розкиду умов експлуатації енергетичного обладнання. Подано узагальнене формулювання та числове розв'язування методом Бубнова–Гальоркіна задач континуальної механіки руйнування, що потрібно для визначення показників довговічності. Як приклад використання запропонованих підходів розглянуто визначення показників довговічності

для теплообмінних труб пароперегрівника парового котла в умовах повзучості та корозійного розтріскування. Показано, що оцінка довговічності по середньому ресурсу може бути завищеною, тому найбільш повним показником довговічності є гама-відсотковий ресурс.

Введение

Долговечность – это способность элемента конструкции сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с перерывами, предусмотренными для технического обслуживания и ремонта, которая характеризуется наработкой до наступления предельного состояния – ресурсом [1]. Актуальность проблемы долговечности энергетического оборудования обусловлена в первую очередь повышением рабочих параметров для улучшения его экономичности и несоответствием условий эксплуатации расчетным режимам [2].

В континуальной механике разрушения степень поврежденности материала на микроуровне определяется в точке элемента конструкции при помощи характеризующих разные механизмы накопления микроповреждений параметров, нулевые значения которых отвечают материалу в исходном состоянии, а значения, равные единице, отвечают образованию макроскопического дефекта [3]. Наибольшее распространение методы континуальной механики разрушения получили при изучении деформирования и разрушения тел в условиях ползучести [3–5], хотя они позволяют рассматривать разрушение на микроуровне материала, отвечающее различным механизмам, например коррозионному растрескиванию [6], в том числе и с учетом ползучести [7]. Результаты, представленные в упомянутых выше исследованиях, могут быть использованы для оценки долговечности элементов конструкций, отвечающей заданным расчетным режимам эксплуатации, без учета ее вероятного разброса.

Долговечность элементов конструкций с учетом вероятного разброса наиболее полно характеризуется гамма-процентным ресурсом – наработкой, в течение которой предельное состояние не будет достигнуто с заданной вероятностью гамма, выраженной в процентах; средний ресурс представляет собой математическое ожидание времени достижения предельного состояния [8]. Целью данной работы является оценка долговечности элементов конструкций энергетического оборудования на основе континуальной механики разрушения с учетом несоответствия реальных условий эксплуатации расчетным режимам.

1. Определение показателей долговечности элементов конструкций с учетом разброса условий эксплуатации энергетического оборудования

Разброс характеристик материала, химического состава агрессивной пароводяной среды, эксплуатационных режимов приводит к некоторому разбросу для времени достижения предельного состояния элементов конструкций энергетического оборудования, который характеризуется функцией $f = f(t_*)$ плотности распределения, удовлетворяющей условию

$$\int_0^{\infty} f(t_*) dt_* = 1.$$

Оценка показателей долговечности для элементов конструкций энергетического оборудования может быть сведена к определению плотности распределения $f(t_*)$, которая позволит определить гамма-процентный t_γ и средний ресурс $\langle t_* \rangle$ по формулам

$$t_\gamma : \int_0^{t_\gamma} f(t_*) dt_* = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad \langle t_* \rangle = \int_0^{\infty} t_* f(t_*) dt_* . \quad (1)$$

Пусть внешние воздействия на элемент конструкций характеризуются набором N_p функций времени t

$$p_1(t), p_2(t), \dots, p_k(t), \dots, p_{N_p}(t) . \quad (2)$$

Функции времени (2) могут иметь различный физический смысл в зависимости от специфики элемента конструкций. В качестве таких функций могут выступать давление в

трубе, тепловые потоки, частота вращения, концентрации коррозионно-активных компонентов рабочих сред и т.п. Тогда время достижения предельного состояния будет функционалом

$$t_* = t_*(p_1(t), p_2(t), \dots, p_k(t), \dots, p_{N_p}(t)). \quad (3)$$

Чтобы учесть приводящую к разбросу времени (3) неопределенность внешних воздействий, характеризующие эти внешние воздействия функции (2) можно рассмотреть как случайные и представить каноническими разложениями [9]

$$p_k(t) = p_{k0}(t) + \sum_{i=1}^{N_k} p_{ki} P_{ki}(t), \quad k = 1, 2, \dots, N_p. \quad (4)$$

Здесь $p_{k0}(t)$ – математическое ожидание случайной функции; $P_{ki}(t)$ – заданные базисные функции; p_{ki} – некоррелированные случайные величины с равными нулю математическими ожиданиями. Характеристики канонического разложения (3) можно определить по данным соответствующих замеров, выполняемых при эксплуатации энергетического оборудования. Когда нет необходимых статистических данных, можно ограничиться каноническими разложениями (4), отвечающими стационарному случайному процессу и одной базисной функции

$$p_{k0}(t) = \text{const}, \quad N_k = 1, \quad P_{ki}(t) = 1. \quad (5)$$

Допущения (5) отвечают аппроксимации случайной функций $p_k(t)$ константой, значение которой – случайная величина, т. е. $p_k(t) \approx p_k = \text{const}$. Математическое ожидание случайной величины p_k можно выбирать отвечающим номинальным режимам, а дисперсию – в соответствии с экспертными оценками возможных отклонений от номинального режима при эксплуатации. Подставив каноническое разложение (4) в соотношение (3), получим время достижения предельного состояния в виде функции случайных аргументов с заданными математическими ожиданиями, которая в частном случае с учетом соотношений (5) примет вид

$$t_* = t_*(p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_{N_p}). \quad (6)$$

Установление плотности распределения функции (6) по заданным плотностям распределения ее случайных аргументов рассматривается в теории вероятностей [9]. Для одного параметра

$$t_* = t_*(p). \quad (7)$$

Если $g = g(p)$ – плотность распределения параметра p , то плотность $f = f(t_*)$ распределения времени достижения предельного состояния (7) будет иметь вид

$$f(t_*) = g(p(t_*)) \left| \frac{dp(t_*)}{dt_*} \right|, \quad (8)$$

где $p = p(t_*)$ – функция, обратная функции (7).

2. Обобщенная формулировка и численное решение методом Бубнова-Галеркина задач континуальной механики разрушения

Для построения функции (6), необходимой для определения показателей долговечности, следует располагать математической моделью деформирования элемента конструкций с учетом накопления повреждений при эксплуатации. Рассмотрим общие подходы к построению такой математической модели на основе континуальной механики разрушения. Для этого в каждой точке элемента конструкции, положение которой определяется радиус-вектором \mathbf{r} , введем вектор $\mathbf{u}^{(1)} = \mathbf{u}^{(1)}(\mathbf{r}, t)$, компоненты которого характеризуют напряженно-деформированное состояние (перемещения, деформации, напряжения). Чтобы охарактеризовать повреждения материала элементов конструкций, введем вектор $\mathbf{u}^{(2)} = \mathbf{u}^{(2)}(\mathbf{r}, t)$, компонентами которого могут выступать необратимые деформации (ползучести), параметр повреждаемости Качанова–Работнова, концентрация коррозионно-активного компонента (во-

дород, хлор-ион и др.). Тогда уравнения, описывающие деформирование элемента конструкции в операторной форме, примут вид

$$\mathbf{A}^{(1)}(\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}; p_1, \dots, p_{N_p}) = \mathbf{f}^{(1)}(p_1, \dots, p_{N_p}), \quad \mathbf{L}^{(1)}(p_1, \dots, p_{N_p}) \cdot \mathbf{u}^{(1)} = \mathbf{p}^{(1)}(p_1, \dots, p_{N_p}), \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}^{(2)}}{\partial t} + \mathbf{A}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)}, p_1, \dots, p_{N_p}) = \mathbf{f}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)}, p_1, \dots, p_{N_p}),$$

$$\mathbf{L}^{(2)}(\mathbf{u}^{(2)}; \mathbf{u}^{(1)}, p_1, \dots, p_{N_p}) = \mathbf{p}^{(2)}(p_1, \dots, p_{N_p}), \quad \mathbf{u}^{(2)}|_{t=0} = \mathbf{u}_0^{(2)}. \quad (10)$$

Здесь оператор $\mathbf{A}^{(1)}$ и вектор $\mathbf{f}^{(1)}$ отвечают дифференциальным уравнениям, а оператор $\mathbf{L}^{(1)}$ и вектор $\mathbf{p}^{(1)}$ – граничным условиям задачи о напряженно-деформированном состоянии элемента конструкций при заданных внешних воздействиях (2) с учетом текущих повреждений (вектор $\mathbf{u}^{(2)}$). В качестве таких уравнений могут выступать уравнения теории упругости, в которых характеристики материала являются функциями концентрации диффундировавшего водорода и (или) в которых учтены необратимые деформации, образующиеся, например, вследствие ползучести. Оператор $\mathbf{A}^{(2)}$ и вектор $\mathbf{f}^{(2)}$ отвечают дифференциальным уравнениям, а оператор $\mathbf{L}^{(2)}$ и вектор $\mathbf{p}^{(1)}$ – граничным условиям, которые описывают развитие дефектов в материале при заданных внешних воздействиях (2) и текущем напряженно-деформированном состоянии (вектор $\mathbf{u}^{(1)}$). Поле вектора $\mathbf{u}^{(2)}$ в момент времени $t = 0$ обозначено как $\mathbf{u}_0^{(2)}$. В качестве уравнений (10) могут выступать уравнения, описывающие диффузию водорода [10], или теории ползучести инкрементального типа [3–5, 7]. Момент достижения предельного состояния устанавливается выполнением одного из условий

$$\xi_1(\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}) = 1, \xi_2(\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}) = 1, \dots, \xi_k(\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}) = 1, \dots, \xi_{N_\xi}(\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}) = 1. \quad (11)$$

В качестве условий (12) могут выступать, например, условие равенства интенсивности напряжений допускаемому напряжению, зависящему от концентрации диффундировавшего водорода; единице параметра повреждаемости Качанова–Работнова [3–5, 7]; концентрации диффундировавшего водорода или накопленной интенсивности деформаций ползучести своему критическому значению [10]; условие равенства единице параметра растрескивания [6, 7] и т.п. Путем интегрирования уравнений (9), (10) при помощи условий (11) устанавливают момент времени $t = t_*$, отвечающий достижению предельного состояния, и радиус-вектор $\mathbf{r} = \mathbf{r}_*$ точки элемента конструкции, в которой раньше всего это предельное состояние достигается.

Решение уравнений (9), (10) вплоть до выполнения условий (11) для разных значений параметров $p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_{N_p}$, характеризующих внешние воздействия, позволяет получить значения функции (6) в отдельных точках, которые можно использовать для аппроксимации этой самой функции (6). Таким образом, задачи континуальной механики разрушения, представленные в обобщенном виде (9)–(11), позволяют приближенно построить соотношение вида (6), которое вместе с известными плотностями распределения параметров $p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_{N_p}$ позволит установить плотность распределения времени достижения предельного состояния.

Для построения вычислительных алгоритмов дифференциальные уравнения (9), (10) удобно представить в виде одного уравнения в операторной матрично-векторной форме

$$\mathbf{K} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{A}(\mathbf{u}; p_1, \dots, p_{N_p}) = \mathbf{f}(\mathbf{u}; p_1, \dots, p_{N_p}), \quad (12)$$

где вектор \mathbf{u} содержит в себе компоненты как вектора $\mathbf{u}^{(1)}$, так и $\mathbf{u}^{(2)}$.

Неизвестные представим аппроксимациями по заданным системам пробных функций пространственных координат с коэффициентами, зависящими от времени

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{u}_0(\mathbf{r}) + \mathbf{U}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{a}(t). \quad (13)$$

Здесь $\mathbf{U}(\mathbf{r})$ – матрица, составленная из пробных функций; $\mathbf{a}(t)$ – вектор подлежащих определению коэффициентов аппроксимаций. Пробные функции и вектор $\mathbf{u}_0(\mathbf{r})$, продлевающий заданные граничные значения внутрь области элемента конструкции, выберем так, чтобы все граничные условия удовлетворялись тождественно для любого вектора $\mathbf{a}(t)$. Это можно сделать для исследуемых областей произвольной формы и граничных условий с линейными операторами при помощи методов теории R-функций, разработанных акад. В. Л. Рвачевым [11]. Подставив аппроксимации (13) в уравнения (12), запишем условие ортогональности невязки выполнения этих уравнений к пробным функциям в исследуемой области Γ элемента конструкции

$$\int_{\Gamma} \mathbf{U}^T \cdot \left(\mathbf{K} \cdot \left(\mathbf{U} \cdot \frac{d\mathbf{a}}{dt} \right) + \mathbf{A}(\mathbf{u}_0 + \mathbf{U} \cdot \mathbf{a}; p_1, \dots, p_{N_p}) - \mathbf{f}(\mathbf{u}_0 + \mathbf{U} \cdot \mathbf{a}; p_1, \dots, p_{N_p}) \right) d\Gamma = 0. \quad (14)$$

Условие (14) содержит в себе обыкновенные дифференциальные уравнения относительно вектора $\mathbf{a}(t)$, решение которых можно осуществить каким-либо численным методом.

3. Показатели долговечности теплообменных труб пароперегревателя парового котла

Высокие температуры перегрева пара, превышающие 500 °С, заставляют использовать хромоникелевые нержавеющие стали аустенитного класса для изготовления теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов [12]. Помимо высоких температур теплообменные трубы взаимодействуют с пароводяной средой, содержащей хлориды, которые, как известно, приводят к коррозионному растрескиванию хромоникелевых нержавеющих сталей аустенитного класса [13]. На основе предложенных в работе [7] подходов к прогнозированию коррозионного растрескивания с учетом высокотемпературной ползучести элементов конструкций и, в частности труб под внутренним давлением, рассмотрим определение показателей долговечности для прямолинейных участков теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов. Предполагаем, что теплообменная труба, выполненная из стали типа 18-8, имеет наружный радиус 21 мм внутренний радиус 17 мм и нагружена номинальным внутренним давлением 13,8 МПа, содержащей хлориды пароводяной среды, эквивалентной 12,5%-му раствору MgCl_2 . Для описания деформирования такой трубы с учетом коррозионного растрескивания и ползучести используем уравнения работы [7]. Принимаем, что разброс времени достижения предельного состояния трубы обусловлен разбросом внутреннего давления p пароводяной среды. В результате путем решения методом Бубнова–Галеркина уравнений, взятых из работы [7], получаем соотношение вида (7) между временем растрескивания и внутренним давлением, которое в логарифмических координатах оказывается линейным

$$\lg t_* = \lg \beta - \mu \lg p, \quad \mu = 0,8741, \quad \beta = 8,4438 \cdot 10^5 \text{ час} \cdot \text{МПа}^{\mu}. \quad (15)$$

Принимаем, что в процессе эксплуатации давление p может отклоняться на 20% от номинального значения как в меньшую, так и в большую сторону и характеризуется равномерной плотностью распределения в соответствующем интервале. Применением формулы (8) с учетом соотношения (15) получаем плотность распределения времени достижения предельного состояния теплообменной трубы, а по формуле (1) определяем гамма-процентный ресурс и средний ресурс $\langle t_* \rangle = 86098,2$ ч. Расчеты (см. рисунок) показывают, что средний ресурс оказывается больше наработки, в течение которой труба не достигнет предельного состояния с вероятностью 95%.

Выводы

На основе континуальной механики разрушения рассмотрена оценка долговечности элементов конструкций энергетического оборудования; получены показатели долговечности – гамма-процентный и средний ресурс. На основе предложенных здесь подходов с использованием полученных ранее результатов, связанных с прогнозированием коррозионного растрескивания с учетом высокотемпературной ползучести, рассмотрено определение показателей долговечности для теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов. Пока-

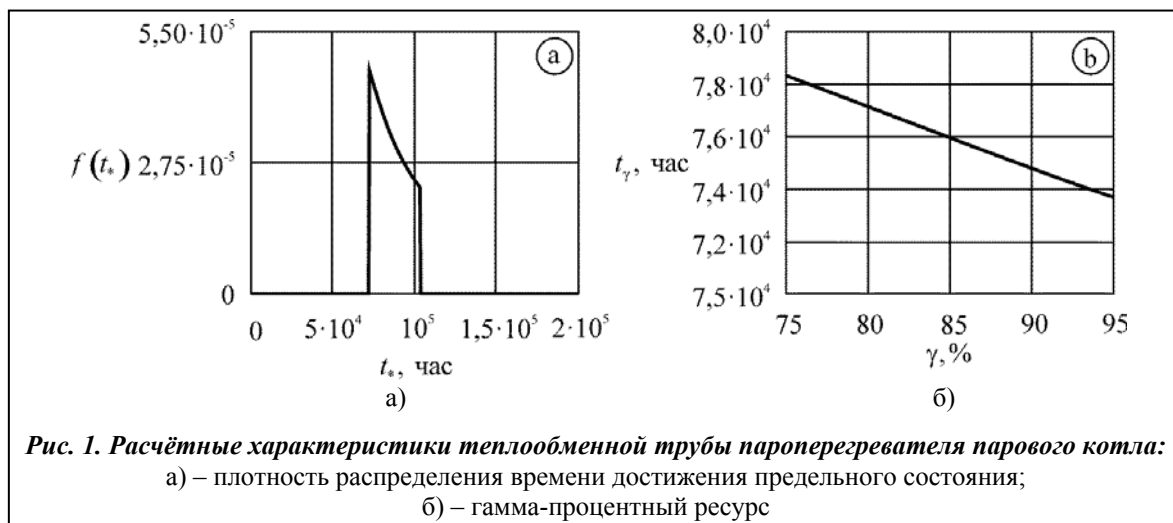


Рис. 1. Расчётные характеристики теплообменной трубы пароперегревателя парового котла:
а) – плотность распределения времени достижения предельного состояния;
б) – гамма-процентный ресурс

зано, что оценка долговечности по среднему ресурсу может оказаться завышенной; наиболее полным показателем долговечности является гамма-процентный ресурс.

Литература

1. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
2. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС / Г. П. Гладышев, Р. З. Аминов, В. З. Гуревич и др.; Под ред. А. И. Андриященко. – М.: Высш. шк., 1991. – 303 с.
3. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
4. Золочевський О. О. Повзучість пластин неканонічної форми з матеріалів із асиметрією властивостей / О. О. Золочевський, В. Л. Рвачов, С. М. Склепус // Мат. методи та фізико.-мех. поля. – 2006. – Т. 49, № 1. – С. 67–74.
5. Определение ресурса лопатки газовой турбины в условиях ползучести на основе континуальной механики разрушения / В. А. Баженов, А. И. Гуляев, С. О. Пискунов, А. А. Шкрыль // Пробл. прочности. – 2006. – № 4. – С. 87–71.
6. Морачковский О. К. Континуальная модель роста трещин коррозионного растрескивания для расчета ресурса конструкций / О. К. Морачковский, Ю. В. Ромашов // Фізико-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 2. – С. 111–116.
7. Морачковский О. К. Прогнозирование коррозионного растрескивания конструкций при высокотемпературной ползучести / О. К. Морачковский, Ю. В. Ромашов // Фізико-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 5. – С. 43–77.
8. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
9. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
10. Андрейків О. Є. В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах / О. Є. Андрейків, О. Гембара. – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
11. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения / В. Л. Рвачев. – К.: Наук. думка, 1982. – 522 с.
12. Резников М. И. Паровые котлы тепловых электростанций / М. И. Резников, Ю. М. Липов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 242 с.
13. Акользин П. А. Коррозионное растрескивание аустенитных сталей в теплоэнергетическом оборудовании / П. А. Акользин, В. Н. Гуляев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.

Поступила в редакцию
10.11.12