

ДЕФОРМАЦИЯ ЧЕРНОВА – ЛЮДЕРСА МЕТАЛЛА ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩЕГО ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Абабков Николай Викторович, доцент каф. ТМС, к.т.н., доц.
Смирнов Александр Николаевич, профессор каф. ТМС, д.т.н., проф.
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
Данилов Владимир Иванович, г.н.с, д.ф.-м.н., проф.
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Введение

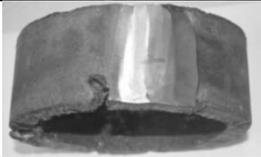
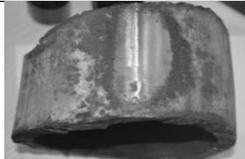
В современных условиях большой объем оборудования теплоэнергетического комплекса в России уже выработал расчетные сроки эксплуатации. Однако экономическая ситуация в стране не позволяет произвести замену, и требует продолжать его использование, несмотря на риски возникновения технических, экологических и гуманитарных катастроф. Особенно это актуально в условиях Крайнего Севера и Сибири.

Важной задачей технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности является проблема оценки остаточного ресурса длительно работающих технических устройств опасных производственных объектов. В настоящее время для этих целей используются комплексные подходы, включающие громоздкие расчетные алгоритмы, анализ результатов неразрушающих и разрушающих испытаний, а также металлографии. Таким образом, оценка ресурса является трудоемким процессом, не всегда обеспечивающим необходимую точность полученных результатов вследствие суммирования разного рода погрешностей (вычисления, оборудование, человеческий фактор). Рассматриваемый в настоящей работе подход может также использоваться решения данной проблемы.

Материалы и методики исследований

Исследования характера локализации деформации были выполнены на образцах стали 20, вырезанных из разрушившейся после эксплуатации в течение 219 тысяч часов водоотпускной трубы фронтального экрана теплоэнергетической установки (таблица 1).

Таблица 1. Общие характеристики образцов металла гибов водоотпускных труб

Описание образца	Изображение
Прямой участок. Дефекты отсутствуют. Наработка 0 тыс.ч	
Растянутая зона. Дефекты отсутствуют. Наработка 219 тыс.ч	

Проводились механические испытания на одноосное растяжение с постоянной скоростью на испытательной машине Walter+Bai AG LFM-125 при одновременной регистрации картин локализации деформации методом цифровой корреляции изображений (DIC) [1-3]. Для сравнения те же самые эксперименты были выполнены на аналогичных образцах, вырезанных из трубы такого же типоразмера, которая в эксплуатации не была (исходное состояние). Обсуждение проводилось в рамках автоволновой теории локализации деформации [4, 5]. Измерение акустических характеристик металла (время задержки поверхностной акустической волны) проводили при помощи измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН» [6–8].

Результаты исследований и их обсуждение

Средний размер ферритных зерен увеличился до 89 мкм против 23 мкм, а перлитных колоний – до 34 мкм, против 17 мкм, то есть, по отношению к исходному состоянию в четыре и в два раза соответственно. Объемная доля перлита не изменилась (25 %), что соответствует содержанию углерода в данной стали (рис. 1). При этом, если в исходном состоянии зерна феррита и колонии перлита преимущественно полиэдрические, равноосные, однородные по размерам, то в материале после эксплуатации на фоне темной перлитной составляющей, окруженной сеткой из полиэдрических зерен феррита, хорошо видны пластины или иглы, видманштеттового феррита, расположенные внутри перлитных колоний параллельно друг другу. Некоторые ферритные пластины полностью изолированы и не имеют общих границ с другими ферритными зернами. Доля видманштеттового феррита в структуре стали составила ~ 23 % от всего объема ферритной составляющей.

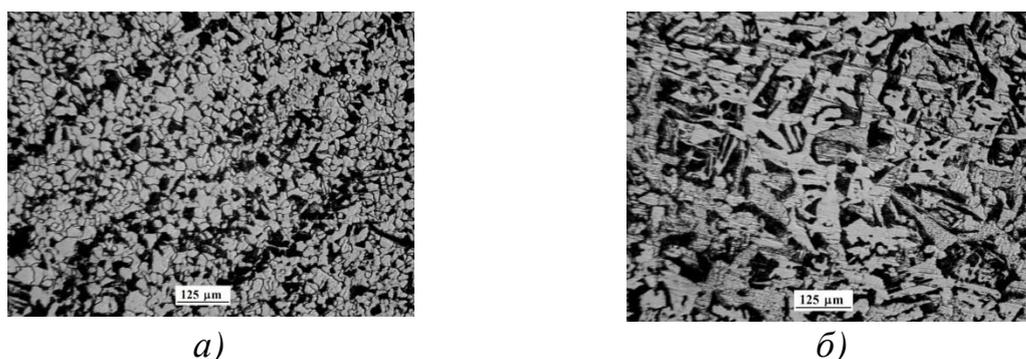


Рис. 1. Микроструктура стали 20 в исходном состоянии (а) и после эксплуатации (б)

Проведенные эксперименты показали, что после эксплуатации произошло более чем двукратное снижение пластичности стали с $22 \pm 1,9$ % до $9,7 \pm 1,1$ % и кардинальное изменение вида диаграммы нагружения (рис. 2).

Эволюция картин локализации деформации, сопровождающаяся возникновением стабильных зон локализации деформации, проявляется и в исходном состоянии, и в любом другом. Следовательно, всегда можно определять времена появления t_{loc} , где в дальнейшем образуется шейка и происходит разрушение. В таблице 2

приведены значения t_{loc} для всех исследованных образцов. Видно, что после эксплуатации среднее время появления устойчивой зоны локализации уменьшилось более чем в три раза, по сравнению с исходным состоянием.

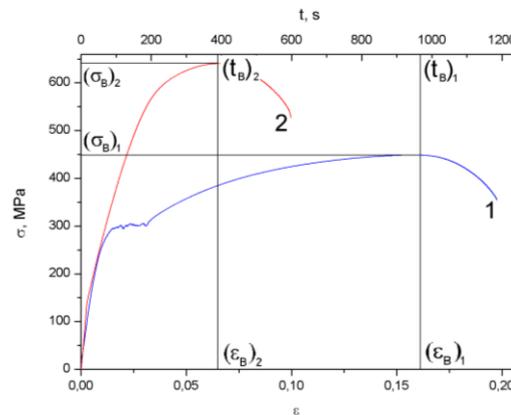


Рис. 2. Диаграммы нагружения стали 20:
 1 – исходное состояние, 2 – после эксплуатации

Таблица 2. Значения t_{loc} , t_{crac} и t_B для всех исследованных образцов

No.	Исходное состояние					После эксплуатации					
	1	2	3	4	Average	1	2	3	4	5	Average
t_{loc} , с	770	1070	780	1070	922±170	186	300	168	168	312	227±73
t_B , с	960	1367	951	1173	1112±198	354	468	420	366	414	404±46
t_{crac} , с	1342	1655	1187	1376	1390±195	590	793	709	651	599	688±84
a_1	0,52	0,67	0,70	0,82	0,69±0,09	0,68	0,43	0,28	0,29	0,67	0,47±0,20
a_2	0,80	0,78	0,82	0,90	0,82±0,05	0,52	0,64	0,40	0,46	0,75	0,51±0,10

Разброс времен t_{loc} для каждого из рассматриваемых состояний может быть обусловлено случайными колебаниями пластичности исследованных образцов выражаемой, например, относительным удлинением до разрыва δ . Так как нагружение происходит с постоянной скоростью v_{load} , между деформацией образца и временем существует прямая связь

$$\varepsilon_{loc} = \frac{v_{load} t_{loc}}{l_0}, \quad (1)$$

где l_0 – первоначальная длина образца. Тогда отношение времен t_{loc} и t_{crac} a_1 показывает долю однородной деформации от всей деформации материала до разрушения

$$a_1 = \frac{t_{loc}}{t_{crac}} = \frac{\varepsilon_{loc}}{\delta}. \quad (2)$$

Если произвести нормировку на время t_B , соответствующее максимальному напряжению σ_B , то можно определить долю однородной деформации до начала падающей части кривой нагружения a_2

$$a_2 = \frac{t_{loc}}{t_B} = \frac{\varepsilon_{loc}}{\varepsilon_B}. \quad (3)$$

Видно, что средние значения этих параметров a_1 и a_2 существенно отличаются для рассматриваемых состояний материала. Наибольшие различия

наблюдаются для параметра a_2 , который к тому же обнаруживает наименьший разброс в каждой серии ($0,82 \pm 0,05$ для исходного состояния и $0,51 \pm 0,10$ для состояния после эксплуатации).

Разница между общим временем растяжения образца до разрушения и временем до появления устойчивой зоны локализации макродеформации $t_{crac} - t_{loc}$ для разных состояний (как в исходном, так и после эксплуатации) стали составляет $464,5 \pm 3,5$ с (рис. 3, а). Таким образом, время t_{loc} – это параметр, по которому можно оценивать ресурс технического устройства. Если t_{loc} в исходном состоянии принять за 100 %, то после эксплуатации t_{loc} составляет 24,6 %, то есть выработка ресурса металла паропровода после эксплуатации составила 75,4 % (рис. 3, б). Так как нам известен срок эксплуатации паропровода, из которого были изготовлены образцы, и он составляет 219 тыс. час, то можно с уверенностью говорить, что данный металл гарантировано способен проработать еще 71,45 тыс. час или немногим более 8 лет.

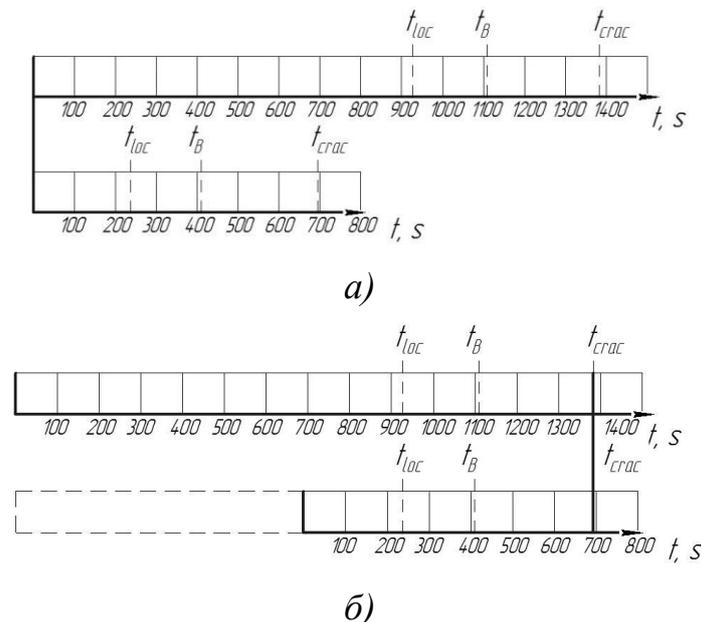


Рис. 3. Сравнение времени испытания на растяжение образца в исходном состоянии и после длительной эксплуатации:

а – привязка к началу испытания; б – привязка к моменту разрушения

При проведении технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности не всегда есть возможность вырезки металла из объекта, поэтому часто единственным источником информации о состоянии металла является неразрушающий контроль. В настоящее время разрабатываются и внедряются методы контроля, измеряемые характеристики которых чувствительны к изменениям структуры и механических характеристик. Одним из таких методов является спектрально-акустический метод контроля.

На рис. 4 представлена зависимость времени задержки поверхностной акустической волны от времени испытания на растяжение образцов из стали 20.

Как видно из графика (рис. 4), с увеличением времени испытания на растяжение увеличивается и время задержки поверхностной акустической волны. Используя полученный график, можно по параметрам спектрально-акустического

контроля определять степень достижения металлом устойчивой локализации макродеформации, т.е. определять стадию предразрушения.

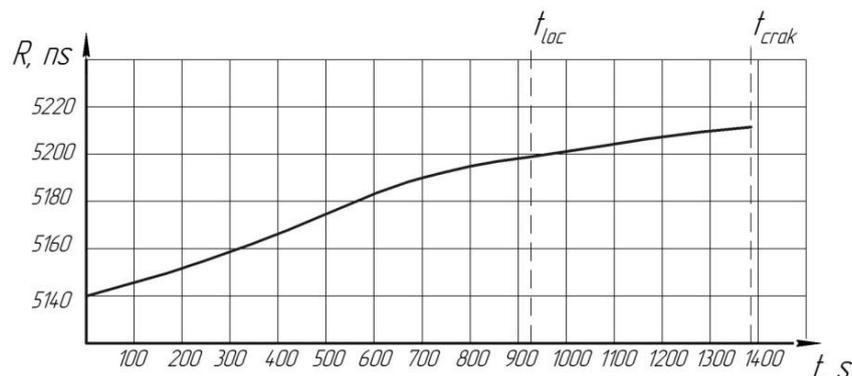


Рис. 4. График зависимости времени задержки поверхностной акустической волны от времени испытания на растяжение образцов из стали 20

Вывод

Выполнены исследования образцов металла гибов водоопускных труб в исходном состоянии и с наработкой 219 тыс. часов неразрушающими и разрушающими методами. На основании представленных результатов и их обсуждения можно утверждать, что информация о локализации макродеформации совместно с данными спектрально-акустического контроля может быть использована для оценки остаточного ресурса длительно работающего теплоэнергетического оборудования.

Список литературы

1. A. Chrysochoos, H. Louche, International Journal of Engineering Science 38, No. 16, 1759-1788 (2000).
2. H. B. Sun, F. Yoshida, M. Ohmori, X. Ma, Materials Letters 57, No. 29, 4535-4539 (2003).
3. S. Avril, F. Pierron, M. A. Sutton b, J. Yan, Mechanics of Materials 40, 729-742 (2008).
4. Данилов, В. И. Деформация Людерса в сварных соединениях / В. И. Данилов, А. Н. Смирнов, В. В. Горбатенко и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2018. – Т. 61. № 2. – С. 128–134.
5. Смирнов, А. Н. Влияние степени деформации сварных соединений углеродистых сталей на структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений / А. Н. Смирнов, Э. В. Козлов, Е. А. Ожиганов и др. // Сварка и диагностика. – 2016. – № 3. – С. 25–28.
6. Смирнов, А. Н. Анализ физико-механических показателей и состояния длительно работающего металла энергооборудования / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, А. С. Глинка и др. // Упрочняющие технологии и покрытия, 2011. – № 11 (83). – С. 40–48.
7. Смирнов, А. Н. Критерии оценки состояния и ресурса длительно работающих барабанов котлов высокого давления / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков // Сварка и диагностика, 2013. – № 4. – С. 55–59.
8. Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Абабков Н. В. Разрушение и диагностика металлов. – Москва-Кемерово: Инновационное машиностроение. 2016. – 479 с.