

## ДИАГНОСТИКА МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ НА РАННИХ СТАДИЯХ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ И ОЦЕНКА НДС МАТЕРИАЛА КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© 2011 В. В. Мишакин, Н. В. Данилова, К. В. Курашкин, В. А. Ключников, А. В. Гончар

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

В статье представлены результаты исследования конструкционных сталей акустическим, оптическим, вихретоковым и магнитным методами НК. Предложены способы оценки степени деградации материалов на ранних стадиях усталостного разрушения и определения напряженного материала.

*Неразрушающий контроль, поврежденность, акустические параметры, микропластическая деформация, усталостное разрушение, напряженное состояние.*

Развитие неразрушающих методов оценки состояния материалов является актуальной задачей.

Одним из самых опасных видов разрушения является усталостное. Так, из акта технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС, по результатам комплексных исследований выявлено, что основной причиной аварии, а именно разрушения шпилек, является развитие усталостных повреждений [1]. В общем случае процесс усталости связан с накоплением и взаимодействием дефектов кристаллической решётки (вакансий, междоузельных атомов, дислокаций и дисклинаций, двойников, границ зёрен и т.д.) и, как следствие этого, с образованием и развитием трещин. Период накопления рассеянной микроповрежденности составляет более 80% от общей долговечности материала [2]. Важную роль при усталостном разрушении металлов играют процессы деформирования на уровне зерна и формирования полос скольжения. Микропластические деформации в начале процесса разрушения локализуются в так называемых “слабых” зонах материала, сравнимых с размером зерна [3]. Главными носителями пластической деформации при циклическом нагружении являются устойчивые полосы скольжения [2], в которых, как правило, и происходит зарождение микротрещин [3].

Структурные изменения в процессе усталостного разрушения приводят к изменению физических свойств, что позволяет использовать методы неразрушающего контроля для диагностики состояния кон-

рукций, эксплуатирующихся в условиях циклических нагрузок.

Проведённые ранее исследования [4] показали, что акустическим методом можно обнаружить деградацию структуры материала на ранних стадиях разрушения, задолго до образования макротрещины.

Изменение электросопротивления и магнитных характеристик при накоплении рассеянной микроповрежденности позволяет использовать токовихревой метод для оценки состояния циклически нагружаемого материала.

Непосредственно наблюдать процесс развития микропластических деформаций и формирование полос скольжения можно оптическим методом. Данный метод даёт возможность определять не только фазовый состав и размер зерна, но и контролировать другие характеристики, например величину микропластической деформации.

Важной задачей неразрушающего контроля является определение напряжённо-деформированного состояния (НДС) материала конструкций. В настоящей работе рассматривается проблема оценки остаточных механических напряжений в сварных соединениях труб с помощью ультразвукового и магнитного методов. Известно, что высокий уровень действующих механических напряжений является важным условием разрушения трубопроводов.

Одним из основных параметров ультразвукового эхо-метода является скорость упругих волн. При одностороннем доступе к конструкции, когда неизвестна длина акустического пути, целесообразно измерять соотношения скоростей или времён распро-

странения поперечных и продольных волн, а также производные от них величины. В настоящей работе в качестве диагностических параметров, определяемых акустическим эхо-методом, использовались коэффициенты Пуассона, измеренные вдоль и поперек направления проката:

$$v_{31} = \frac{0,5 - (V_1/V_3)^2}{1 - (V_1/V_3)^2} = \frac{0,5 - (t_3/t_1)^2}{1 - (t_3/t_1)^2},$$

$$v_{32} = \frac{0,5 - (V_2/V_3)^2}{1 - (V_2/V_3)^2} = \frac{0,5 - (t_3/t_2)^2}{1 - (t_3/t_2)^2}, \quad (1)$$

а также параметр акустической анизотропии

$$A = \frac{2(V_1 - V_2)}{V_1 + V_2} = \frac{2(t_2 - t_1)}{t_1 + t_2}, \quad (2)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – скорости, а  $t_1$  и  $t_2$  – времена распространения поперечных волн, поляризованных вдоль соответствующих осей ортотропного материала,  $V_3$  и  $t_3$  – скорость и время распространения продольной волны. Направление распространения упругих волн перпендикулярно плоскости проката материала.

Параметр акустической анизотропии зависит, в первую очередь, от кристаллографической текстуры [5] и, в гораздо меньшей степени, от структурной поврежденности. Коэффициенты Пуассона зависят как от накопленной микроповрежденности, так и от текстуры материала.

На величине акустических параметров также отражается напряженное состояние материала, что связано с явлением акустоупругости [6].

#### Исследование усталостного разрушения

Для исследований была выбрана сталь 08X18H10T, широко применяемая в машиностроении при изготовлении сварной аппаратуры, работающей в средах повышенной агрессивности (растворах кислот, щелочей и солей), теплообменников ядерных энергетических установок, труб, деталей печной арматуры и других элементов.

В результате проведенных акустических исследований гладких образцов из стали 08X18H10T были получены зависимости скоростей упругих волн и параметра акустической анизотропии от относительного количества циклов нагружения  $N/N^*$  для амплитуд деформации 0.33%, 0.56% и 0.77%, а также связь коэффициентов Пуассона  $v_{31}$  и  $v_{32}$  в процессе циклических испытаний. Из

графиков видно, что изменения скоростей упругих волн (рис. 1,а,б,в) и параметра акустической анизотропии (рис. 1,г) носят не монотонный характер, что объясняется сложным изменением эффективных модулей упругости в процессе циклического нагружения. На величину акустических параметров активно влияют кристаллографическая текстура и накопленная микроповрежденность. Кроме того, при циклическом нагружении аустенитной стали 08X18H10T наблюдается аллотропическое превращение  $\gamma \rightarrow \epsilon$ , в результате которого  $\gamma$ -железо превращается в мартенсит  $\epsilon$  – пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе [7]. Этот фактор также приводит к существенным изменениям упругих свойств материала.

На рис. 2,а приведены зависимости между коэффициентами Пуассона  $v_{31}$  и  $v_{32}$ , измеренными акустическим методом, при циклическом нагружении образцов из стали 08X18H10T. Связь  $\Delta v_{31}$  и  $\Delta v_{32}$  хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Угол наклона кривой  $\Delta v_{31}(\Delta v_{32})$  определяется амплитудой деформации. Для максимальной амплитуды угол минимален.

Эксперимент показал, что длина кривой  $\Delta v_{31}(\Delta v_{32})$  в момент появления макротрещины приблизительно постоянна для разных амплитуд циклической деформации. По мере исчерпания ресурса материала длина кривой растёт, достигая критического значения. Кривую  $\Delta v_{31}(\Delta v_{32})$  предлагается использовать для оценки степени деградации материала на ранних стадиях разрушения до появления макротрещины.

Для оценки состояния материала ввели параметр П:

$$П = \frac{L}{\bar{L}^* + f(\Delta v_{31}, \Delta v_{32})}, \quad (3)$$

где  $L = (\Delta v_{31}^2 + \Delta v_{32}^2)^{1/2}$  – длина кривой  $\Delta v_{31}(\Delta v_{32})$ ,  $\bar{L}^* = 0.016$  – среднее значение длины кривой в момент появления макротрещины,  $f(\Delta v_{31}, \Delta v_{32})$  – функция, которая зависит от угла наклона кривой:

$$f(\Delta v_{31}, \Delta v_{32}) = -0.0045 + 0.0047 \frac{\Delta v_{31}}{\Delta v_{32}} + \dots$$

$$\dots + 0.0002 \left( \frac{\Delta v_{31}}{\Delta v_{32}} \right)^2. \quad (4)$$

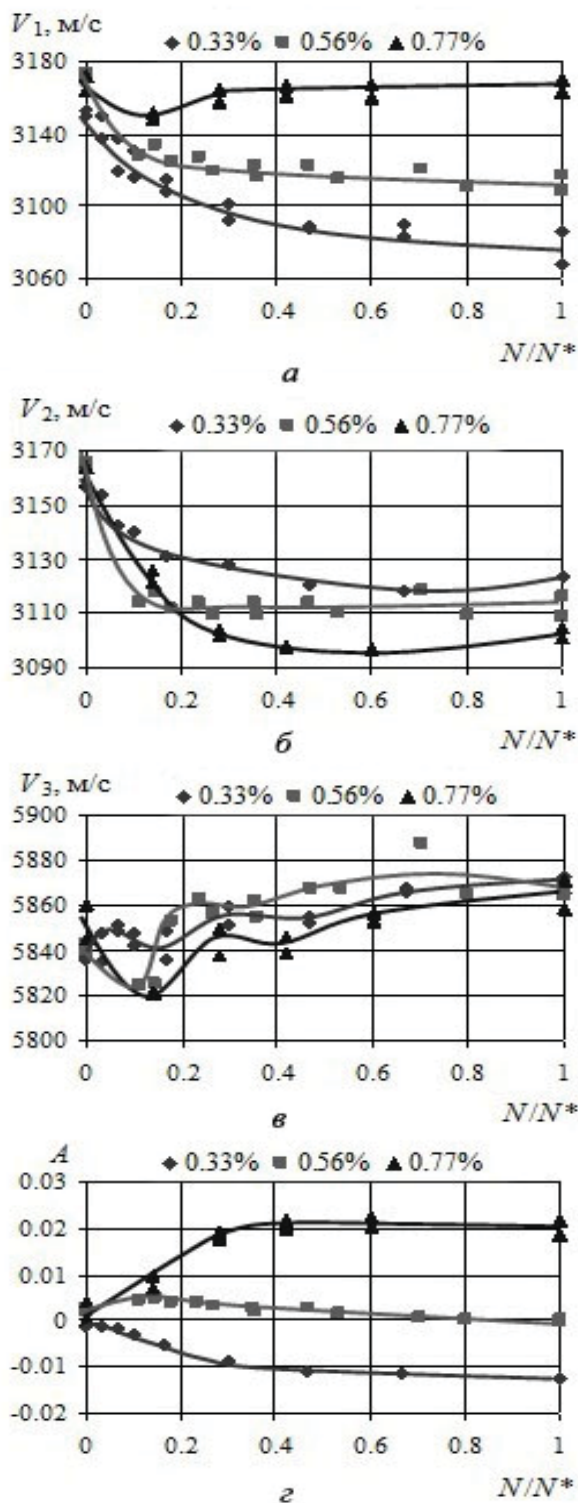


Рис.1. Зависимости скоростей упругих волн и параметра акустической анизотропии от относительного числа циклов нагружения образцов из стали 08X18H10T

Зависимость параметра  $\Pi$  от количества циклов нагружения приведена на рис. 2,б. Момент достижения параметром  $\Pi$  значения, близкого к единице, характеризуется появлением макродефекта.

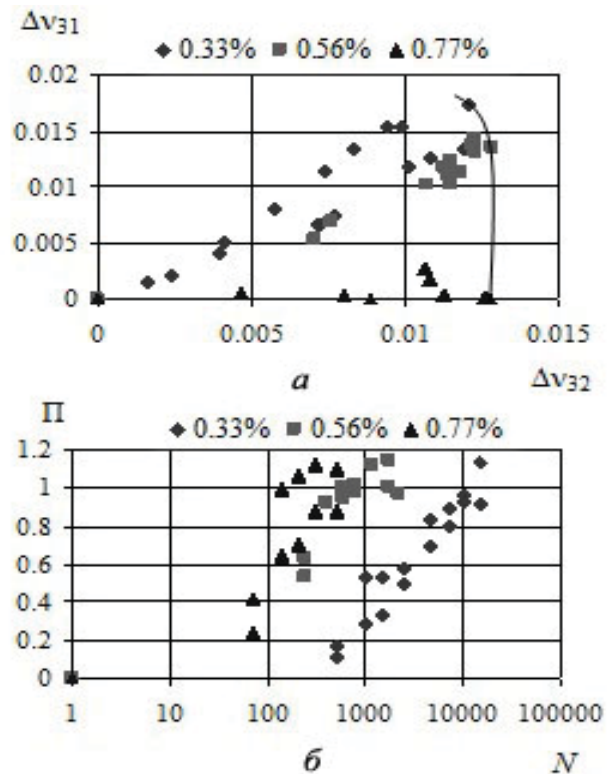


Рис.2. Связь коэффициентов Пуассона (а) и изменение параметра  $\Pi$  (б) при усталостном разрушении образцов из стали 08X18H10T

На сварных образцах из стали 08X18H10T, подверженных усталостному разрушению, с помощью дефектоскопа ВД-70 были проведены токовихревые исследования. Распределение показаний ВД-70 вдоль рабочей части образца представлено на рис. 3. Показания вихретокового дефектоскопа, которые определяются магнитными характеристиками и электропроводностью материала, монотонно изменяются в процессе исчерпания его ресурса. Это связано с мартенситным превращением при усталостном нагружении аустенитной стали. Межфазные границы  $\gamma/\epsilon$  являются опасными местами зарождения и развития микротрещин [7]. Применение дефектоскопа ВД-70 также позволило установить размеры зоны термического влияния сварного шва.

С помощью комплекса СПЕКТР МЕТ были проведены металлографические исследования образцов сталей 08X18H10T и 15ЮА. Были измерены расстояния между точками пересечения опорной линии с границами зёрен. Величина деформации в  $i$ -ом зерне определялась как



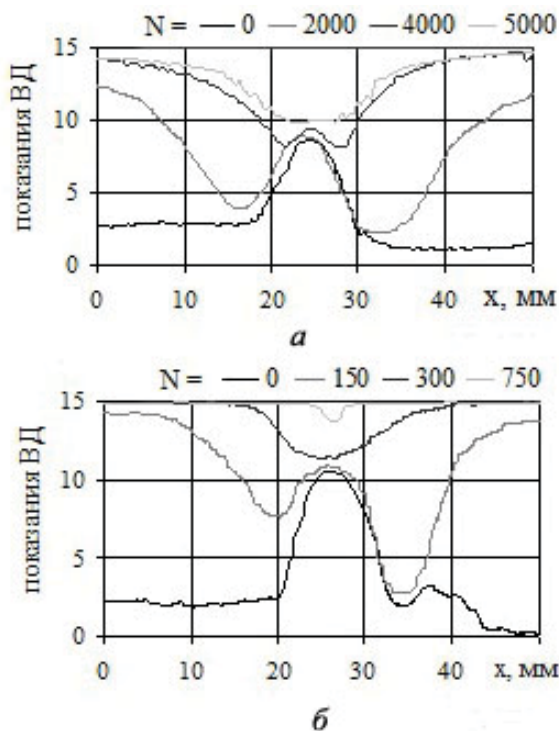


Рис.3. Зависимость показаний ВД-70 от количества циклов нагружения: а – амплитуда деформации 0.31%, б – амплитуда деформации 0.52%

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - l_{i0}}{l_{i0}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $l_{i0}$  – начальное расстояние между точками,  $l_i$  – расстояние между точками после циклического нагружения. Среднее по модулю значение микропластической деформации, измеряемой вдоль и поперек проката, определялось как

$$\varepsilon_{x,y} = \frac{1}{m} \sum_i^m |\varepsilon_i^{x,y}|, \quad (6)$$

где  $m$  – количество зерен, по которым проводились вычисления,  $|\varepsilon_i^{x,y}|$  – абсолютное значение деформации в  $i$ -ом зерне вдоль или поперек оси нагружения. Погрешность измерения величины микропластической деформации не превышала 0.5%.

На рис. 4 представлены зависимости абсолютных значений микропластических деформаций, измеренных вдоль и поперек оси нагружения образцов из стали 08Х18Н10Т, от числа циклов. Для всех испытанных образцов абсолютное значение микропластических деформаций в процессе исчерпания ресурса материала выходит на некоторое постоянное значение.

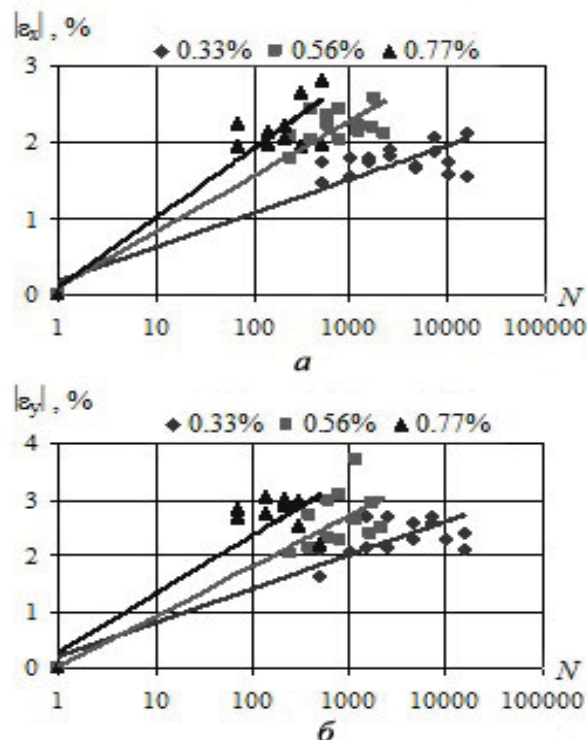


Рис.4. Зависимость абсолютного значения микропластических деформаций от числа циклов нагружения для образцов из стали 08Х18Н10Т

На рис. 5 приведена зависимость микропластической деформации от числа циклов нагружения в образцах стали 15ЮТА. Как видно из рис. 5, на начальном этапе нагружения происходит наиболее интенсивное развитие деформации, а затем её замедление и стабилизация на уровне 7% в районе 40000 циклов. Стабилизацию микропластической деформации можно объяснить появлением микропор и микротрещин в полосах скольжения, способствующих релаксации микронапряжений.

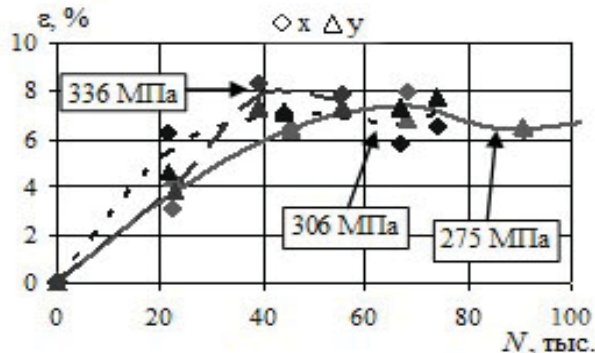


Рис.5. Зависимость величины микропластической деформации от числа циклов нагружения для образцов из стали 15ЮТА

Графики зависимости длины и ширины грубых полос скольжения (ГПС) от количе-

ства циклов нагружения для стали 15ЮТА представлены на рис. 6.

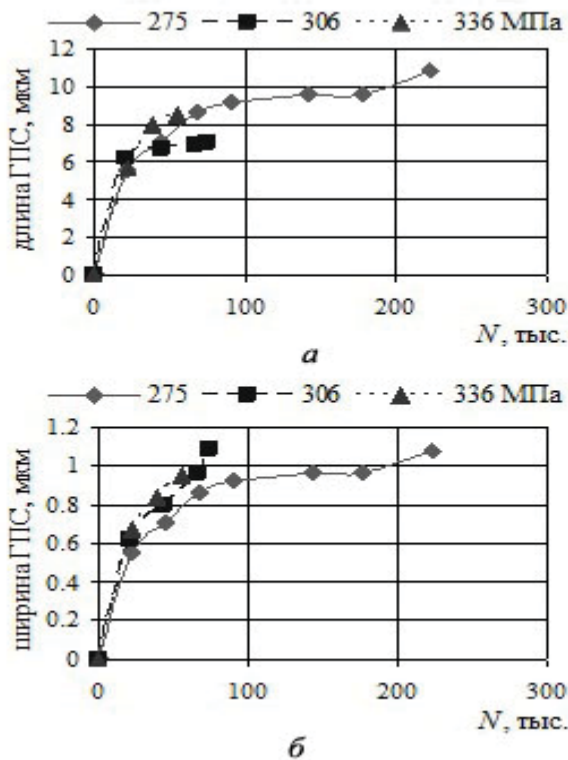


Рис. 6. Зависимость длины (а) и ширины (б) ГПС в материале образцов из стали 15ЮТА от числа циклов нагружения

График зависимости концентрации ГПС от относительного числа циклов нагружения  $N/N^*$ , где  $N^*$  – критическое значение числа циклов, соответствующее появлению макротрещины, представлен на рис. 7.

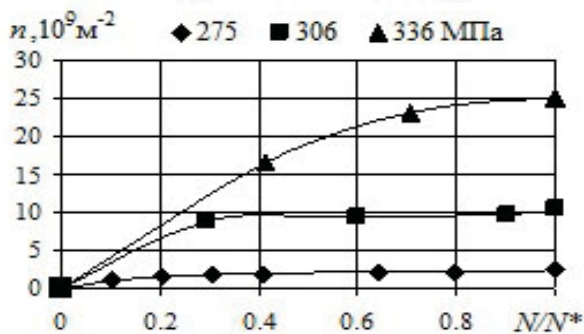


Рис. 7. Зависимость концентрации грубых полос скольжения от относительного числа циклов нагружения для образцов из стали 15ЮТА

Длина и ширина полос скольжения при критическом значении числа циклов для разных амплитуд нагружения отличались несущественно и достигали  $7 \div 11$  мкм и около 1 мкм соответственно. Погрешность измерения длины и ширины грубых полос скольже-

ния – 1 и 0.1 мкм соответственно. Концентрация полос скольжения  $n$  в момент появления макротрещины для различных амплитуд нагружения отличалась от  $2.5 \times 10^9 \text{ м}^{-2}$  до  $25 \times 10^9 \text{ м}^{-2}$ .

Для образцов из стали 15ЮТА были получены зависимости величин микропластических деформаций  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$  от концентрации грубых полос скольжения (рис. 8). Кривые на рис. 8 хорошо разделяются в соответствии с амплитудами нагружения. Зависимость  $\epsilon(n)$  хорошо аппроксимируется прямой с коэффициентом наклона  $q$ . Тангенс угла наклона  $q$  определяет интенсивность изменения микропластической деформации. Параметры  $q$  и  $n$  можно использовать для прогнозирования поврежденности.

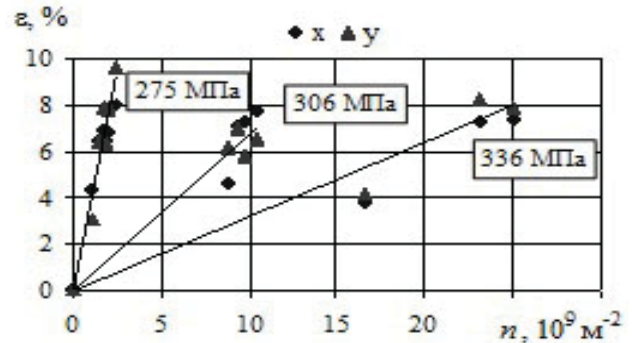


Рис. 8. Зависимость величины микропластических деформаций от концентрации грубых полос скольжения для образцов из стали 15ЮТА

Связь поврежденности  $\psi$ , рассчитанной по формуле Пальмгрена ( $\psi = N/N^*$ ), с параметрами  $q$  и  $n$  представили в виде зависимости

$$\psi = -0.203 + 0.476q - 0.026n + \dots + 0.118nq - 0.132q^2 + 0.001n^2. \quad (7)$$

Между значениями  $\psi$ , рассчитанными с помощью выражения (7) и относительным количеством циклов нагружения  $N/N^*$ , полученным по данным механических испытаний, наблюдается высокая (более 0.9) корреляция. Поле расчётных значений  $\psi$  и экспериментально определённых значений  $N/N^*$  приведено на рис. 9. Наличие высокой корреляции даёт возможность по данным оптических измерений, используя интенсивность изменения микропластической деформации и концентрацию полос скольжения в качестве диагностических параметров, оценить величину поврежденности материала.

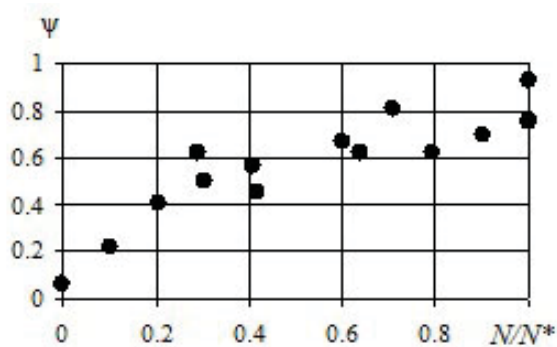


Рис.9. Корреляция величины  $\psi$  и относительного числа циклов нагружения для образцов из стали 15ЮТА

### Оценка остаточных напряжений

Были проведены исследования остаточных сварочных напряжений в элементе трубы из стали X70 и в пластине из стали 35.

В результате акустических исследований элемента трубы магистрального газопровода из стали X70 были получены распределения коэффициентов Пуассона (рис. 10) в направлении, перпендикулярном сварному шву. Зависимости коэффициентов Пуассона от расстояния до сварного шва определяются особенностями формирования текстуры проката материала, из которого изготовлена труба, и влиянием остаточных напряжений.

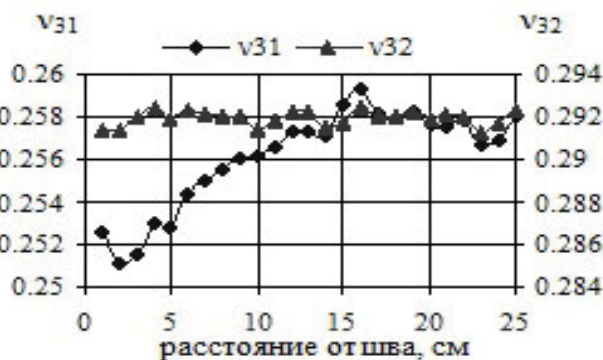


Рис.10. Распределение коэффициентов Пуассона

Взаимосвязь коэффициентов Пуассона  $v_{31}$  и  $v_{32}$  в материале показана на рис. 11. В зонах, в которых напряжения отсутствуют, коэффициенты Пуассона линейно связаны (черные точки):

$$v_{32}^0 = Bv_{31}^0 + Q. \quad (8)$$

Присутствие остаточных сварочных напряжений приводит к отклонению точек  $\{v_{31}; v_{32}\}$  от прямой (белые точки):

$$\delta v = v_{32} - Bv_{31} - Q. \quad (9)$$

Здесь  $B$  и  $Q$  – коэффициенты для данного материала.

Величина отклонения  $\delta v$  зависит от уровня напряжений

$$\delta v = (m_3 - Bm_1)\sigma_1 + (m_4 - Bm_2)\sigma_2, \quad (10)$$

где  $m_i$  – коэффициенты, выражаемые через упругие модули второго и третьего порядка.

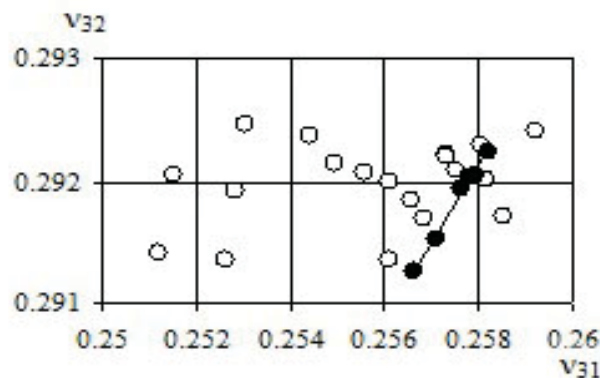


Рис.11. Взаимосвязь коэффициентов Пуассона

На рис. 12 представлена экспериментально полученная зависимость параметра  $\delta v$  от разности главных напряжений в основном металле сварного соединения.

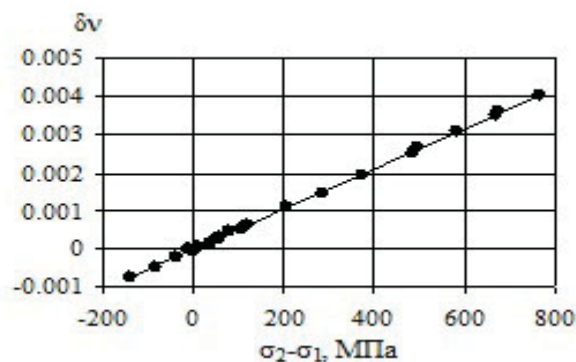


Рис.12. Зависимость параметра  $\delta v$  от разности главных напряжений

В результате регрессионного анализа экспериментальных данных было получено соотношение, которое может быть использовано для оценки уровня напряжений, действующих в данном материале, в режиме безнулевой тензометрии:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = K\delta v, \quad (11)$$

где  $K = 190 \pm 1$  МПа.

Разность главных напряжений определяет величину максимального касательного напряжения, которое играет важную роль при разрушении материала.



С помощью магнитного структуроскопа КРМ-Ц-К2М были проведены исследования остаточных сварочных напряжений в пластине из стали 35. Осуществляли измерения коэрцитивной силы до и после разрезки сварной плиты. Измерения в каждой зоне проводились при четырёх положениях датчика. Абсолютная погрешность измерения коэрцитивной силы не превышала 0.1 А/см. В качестве информативных параметров вычислялись следующие величины:

$$H_{C1} = \frac{1}{2}(H_C^{90^\circ} + H_C^{270^\circ}),$$

$$H_{C2} = \frac{1}{2}(H_C^{0^\circ} + H_C^{180^\circ}), \quad (12)$$

где верхний индекс обозначает угол по отношению к оси шва, под которым ориентировался датчик.

Изменение коэрцитивной силы до и после разрезки плиты характеризуется следующей величиной:

$$\Delta H_C = H_C^\sigma - H_C^0. \quad (13)$$

Графики изменения коэрцитивной силы от расстояния до шва показаны на рис. 13.

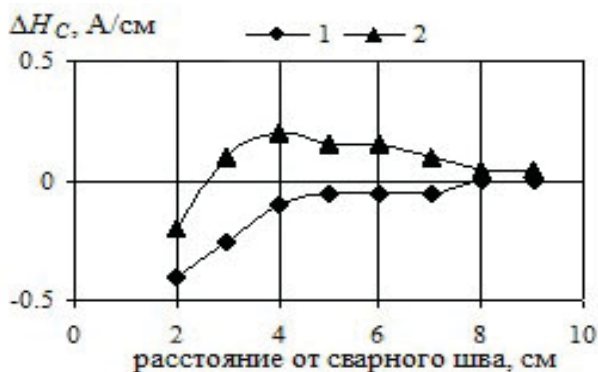


Рис. 13. Зависимость изменения коэрцитивной силы от расстояния до шва

С помощью тензометрической станции ИСД-3 были измерены остаточные напряжения на расстоянии 2 см и 5 см от сварного шва. Напряжения на краях пластины равнялись нулю. В результате было установлено, что на величину коэрцитивной силы влияют только те напряжения, которые действуют в направлении измерения. Получена единая зависимость  $\Delta H_C(\sigma)$  (рис. 14), которая хорошо описывается полиномом второй степени (коэффициент корреляции 0.99):

$$\Delta H_C = k_1\sigma + k_2\sigma^2, \quad (14)$$

где  $k_1 = 8.1 \times 10^{-3}$  А / (см · МПа),  $k_2 = 3.1 \times 10^{-5}$  А/(см·МПа<sup>2</sup>). Зависимость  $\Delta H_C(\sigma)$  имеет минимум при  $\sigma \approx 130$  МПа, что составляет около 50% от предела текучести стали 35 ( $\sigma = 245$  МПа). Полученный результат совпадает с результатом работы [8]. Для оценки напряжений по данным измерений коэрцитивной силы можно пользоваться более простым соотношением:

$$\sigma_{1,2} = k\Delta H_{C1,2}, \quad (15)$$

где  $k = 155 \pm 9$  МПа·см/А.

Соотношение (15) с хорошей точностью выполняется для растягивающих напряжений, не превышающих 50% от предела текучести.

На рис.15 представлены распределения остаточных напряжений, измеренных с помощью тензодатчиков и рассчитанных по формуле (15) через изменение коэрцитивной силы.

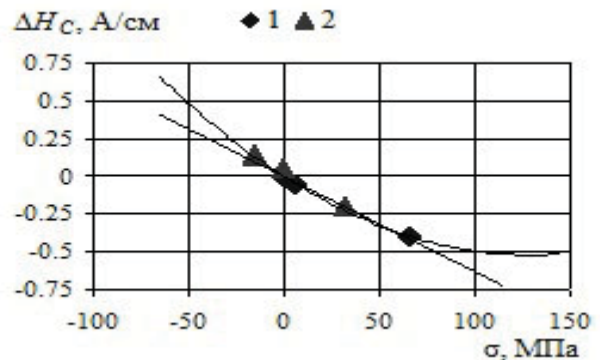


Рис. 14. Зависимость изменения коэрцитивной силы от механического напряжения

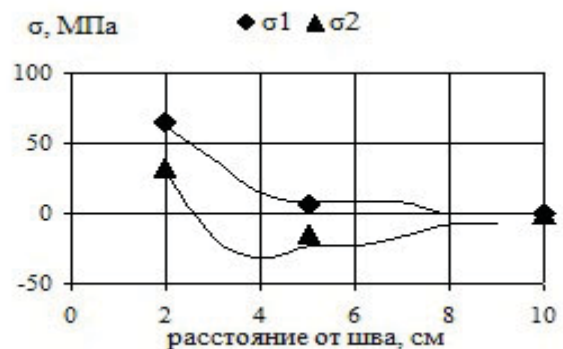


Рис. 15. Остаточные напряжения, измеренные с помощью ИСД-3 (точки) и рассчитанные по формуле (15) (сплошные линии)

### Заключение

Предложен алгоритм оценки степени деградации материала 08X18H10T на ранней стадии разрушения, основанный на измерениях с помощью акустического эхо-метода коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$ . Эксперимент показал, что по мере исчерпания ресур-

са материала растёт длина кривой  $\Delta v_{31}(\Delta v_{32})$ . В момент появления макротрещины длина кривой достигает критического значения, приблизительно постоянного для разных амплитуд циклической деформации.

Показана возможность использования токовихревого метода для оценки ресурса материала сварных соединений из стали 08X18H10T при усталостном нагружении.

На образцах из стали 15ЮТА при разных амплитудах нагружения получена высокая корреляционная связь, близкая к линейной, между концентрацией грубых полос скольжения и величиной микропластической деформации. Предложено использовать интенсивность изменения микропластической деформации и концентрацию грубых полос скольжения, определяемых оптическим методом, в качестве диагностических параметров для оценки уровня повреждённости материала.

Предложен способ оперативного контроля уровня остаточных механических напряжений непосредственно на объекте в режиме безнулевой акустической тензометрии. Способ основывается на анализе коэффициентов Пуассона  $\nu_{31}$  и  $\nu_{32}$ , измеряемых ультразвуковым эхо-методом. В отсутствие напряжений в материале имеет место линейная зависимость  $\nu_{32}(\nu_{31})$ , связанная с особенностями формирования текстуры проката. Присутствие остаточных сварочных напряжений приводит к отклонению точек  $\{\nu_{31}; \nu_{32}\}$  от исходной прямой. По величине отклонения можно оценить уровень напряжений. Алгоритм был опробован на трубе магистрального газопровода.

В результате исследований остаточных напряжений в сварной плите из стали 35 с помощью магнитного метода было установлено, что на величину коэрцитивной силы влияют только те напряжения, которые действуют в направлении измерения. Получена единая зависимость  $\Delta H_c(\sigma)$ , которая имеет минимум около 50% от предела текучести стали 35.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 09-08-00892, 09-08-00827 и 11-08-97070-р\_поволжье).

### **Библиографический список**

1. Акт технического расследования причин аварии, происшедшей 17 августа 2009 года в филиале ОАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного» от 04.10.2009.
2. Терентьев, В.Ф. Усталость металлических материалов [Текст] / В.Ф. Терентьев. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
3. Гурьев, А.В. Роль микропластических деформаций в формировании частотной зависимости [Текст] / А.В. Гурьев, А.П. Карпов // Проблемы прочности – 1986. – №4. – С. 24–27.
4. Использование оптического и акустического методов контроля для оценки повреждённости сталей на ранних стадиях усталостного разрушения [Текст] / Ф.М. Митенков, В.В. Мишакин, С.Н. Пичков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – № 12 – С. 40–45.
5. Sayers, C.M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates [Text]/ C.M. Sayers // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1982. – № 15. – P. 2157–2167.
6. Зарембо, Л.К. Введение в нелинейную акустику [Текст] / Л.К. Зарембо, В.А. Крайильников. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
7. Соснин, О.В. Закономерности эволюции дислокационных субструктур в сталях при усталости [Текст] / О.В. Соснин [и др.] // Вестн. СамГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. – 2004. – № 27. – С. 185–192.
8. Бердник, М.М. Исследование влияния плоского напряженного состояния на изменение магнитных характеристик трубных сталей [Текст] / М.М. Бердник, Ю.В. Александров, Р.В. Агинея // Наука в нефтяной и газовой промышленности. – 2010. – № 3. – С. 2–6.



**DIAGNOSTICS OF CONSTRUCTIONS' MATERIALS IN THE EARLY STAGES OF FATIGUE FAILURE AND ESTIMATION OF THE STRESS-STRAIN CONDITION OF CONSTRUCTIONS' MATERIAL BY METHODS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING**

© 2011 V. V. Mishakin, N. V. Danilova, K. V. Kurashkin, V. A. Klyushnikov, A. V. Gonchar

The Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod Branch

The article presents the results of construction steels study by the acoustical, optical, eddy current and magnetic methods of NDT. The ways of assessing of the degradation degree of material in the early stages of fatigue failure and the stress condition of material were suggested.

*Non-destructive testing, damage, acoustic parameters, microplastic strain, fatigue failure, stress condition.*

**Информация об авторах**

**Мишакин Василий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Нижегородского филиала Института Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Область научных интересов: неразрушающий контроль, деформация, упругие волны, структура, прочность, акустические параметры.

**Данилова Наталья Васильевна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Нижегородского филиала Института Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Область научных интересов: неразрушающий контроль, деформация, упругие волны, математическое моделирование динамики систем, колебания механических систем.

**Курашкин Константин Владимирович**, младший научный сотрудник Нижегородского филиала Института Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Область научных интересов: неразрушающий контроль, напряженное состояние материала, акустический метод, деформация, упругие волны.

**Клюшников Вячеслав Александрович**, младший научный сотрудник Нижегородского филиала Института Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Область научных интересов: неразрушающий контроль, деформация, упругие волны, структура, ультразвук.

**Гончар Александр Викторович**, младший научный сотрудник Нижегородского филиала Института Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Тел.: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Область научных интересов: неразрушающий контроль, деформация, упругие волны, структура, ультразвук.

**Mishakin Vasily Vasilievich**, Doctor of Engineering Science, professor, Head of the Materials Diagnostic Laboratory. Job: The Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod Branch. Phone: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Area of research: damage, nondestructive testing, deformation, elastic waves, strength, acoustic parameters.

**Danilova Natalya Vasilievna**, Candidate of science, Senior Research Fellow The Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod Branch. Phone: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Area of research: nondestructive testing, deformation, elastic waves, mathematical modeling of system dynamics, vibrations of mechanical systems.

**Kurashkin Konstantin Vladimirovich**, Junior research fellow, The Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod Branch. Phone: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Area of research: nondestructive testing, stress state of the material, the acoustic method, the nonlinearity of the elastic material properties, deformation, elastic waves.

**Klyushnikov Vyacheslav Alexandrovich**, Junior research fellow. The Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod Branch. Phone: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Area of research: nondestructive testing, deformation, elastic waves, structure, ultrasound.

**Gonchar Alexandr Victorovich**, Junior research fellow. The Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod Branch. Phone: (831) 432-21-59. E-mail: [imndt31@mts-nn.ru](mailto:imndt31@mts-nn.ru). Area of Research: nondestructive testing, deformation, elastic waves, structure, ultrasound.