

УДК 620.179.16

В.А. Ключников, В.В. Мишакин, Н.В. Данилова

**ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛИ 08X18N10T
НА РАННИХ СТАДИЯХ УСТАЛОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

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

Представлены результаты исследования акустическим и оптическим методами контроля стали 08X18N10T, подвергаемой усталостному разрушению. По результатам испытаний установлены корреляционные связи уровня поврежденности с акустическими характеристиками и параметрами микропластических деформаций, определяемыми оптическим методом. Предложены алгоритмы оценки поврежденности исследуемого материала на основании данных акустических и оптических измерений на ранних стадиях усталостного разрушения.

Ключевые слова: поврежденность, неразрушающий контроль, акустические параметры, оптический метод, характеристики микропластичности, многоцикловая и малоцикловая усталость.

Введение

Оценка состояния материалов без их разрушения непосредственно на конструкции, учитывая существенную выработку ресурса значительного количества отечественных предприятий машиностроительного комплекса, является актуальной задачей.

Среди методов НК, достаточно чувствительных к структурному состоянию и поврежденности, можно выделить относительно дешевый и безопасный акустический метод. Как правило, данный метод используют для выявления макродефектов (в том числе усталостных трещин) материалов конструкций различного назначения. Проведенные ранее исследования [1, 2] показали, что структурно-чувствительные акустические параметры позволяют обнаруживать деградацию структуры материала на ранних стадиях разрушения, задолго до образования макротрещины.

Другим методом, позволяющим непосредственно контролировать структурные изменения, является оптический, позволяющий измерять не только характеристики структуры, но и величину микропластических деформаций, которые играют важную роль в разрушении металлов и сплавов при статическом и усталостном разрушении [3, 4].

Следует отметить особенности усталостного разрушения. Область многоциклового усталости (МнЦУ) в сравнении с областью малоциклового усталости (МЦУ) характеризуется большими упругопластическими деформациями. Пластическое деформирование происходит только в некоторых областях материала, сравнимых с размерами зерен. Микропластические деформации в начале процесса разрушения, как и поврежденность, локализуются в так называемых «слабых» зонах [4]. Имеется закономерность локализации, заключающаяся в постоянстве и закреплении микроочагов повышенной и пониженной деформации, и соответственно в формировании микропор, микротрещин и других дефектов внутри «слабых» зон [4].

Область МЦУ характеризуется большими пластическими деформациями, накоплением односторонней деформации в случае мягкого режима нагружения, интенсивным накоплением микроповреждений во всем объеме материала, изменением кристаллографической текстуры. Изменение структурных характеристик приводит к изменению акустических параметров.

Целью работы было исследование влияния усталостного разрушения на акустические параметры и характеристики микропластичности коррозионно-стойкой стали аустенитного класса 08X18N10T и разработка алгоритма оценки поврежденности на основе акустических и оптических измерений.

В качестве основных акустических параметров для проведения исследований были выбраны скорости объемных упругих волн (УВ) (поперечные и продольные), а также соотношение этих скоростей или времени их распространения. Для элементов конструкций, имеющих односторонний доступ, целесообразно использовать параметры, выражающиеся через соотношение времени распространения, так как в этом случае не надо измерять длину акустического пути (толщину элемента). В качестве таких параметров можно выбрать коэффициенты Пуассона ν_{zx} , ν_{zy} (измеренные вдоль и поперек направления проката соответственно), которые определяются выражениями:

$$\nu_{zx} = \frac{V_{zz}^2 - 2V_{zx}^2}{2(V_{zz}^2 - V_{zx}^2)} = \frac{\tau_{zx}^2 - 2\tau_{zz}^2}{2(\tau_{zx}^2 - \tau_{zz}^2)}; \quad \nu_{zy} = \frac{V_{zz}^2 - 2V_{zy}^2}{2(V_{zz}^2 - V_{zy}^2)} = \frac{\tau_{zy}^2 - 2\tau_{zz}^2}{2(\tau_{zy}^2 - \tau_{zz}^2)}, \quad (1)$$

где V_{zi} и τ_{zi} – скорость и время распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль ($i = x$) или поперек ($i = y$) оси симметрии ортотропного материала; V_{zz} и τ_{zz} – скорость и время распространения продольных УВ соответственно.

Учитывая, что разрыхление материала за счет образования микропор, микротрещин влияет на модуль объемного сжатия K и модуль сдвига μ [5, 6]:

$$K = K_0 + k_{1\psi}\psi, \quad \mu = \mu_0 + k_{2\psi}\psi, \quad (2)$$

где $k_{1\psi}$ и $k_{2\psi}$ – параметры; ψ – структурная поврежденность, связанная с разуплотнением материала: $\psi = (\rho_0 - \rho) / \rho_0$ (ρ_0 и ρ – плотности материала до и после образования микропор, микротрещин); K_0 и μ_0 – начальные значения модуля всестороннего сжатия и модуля сдвига соответственно, и также учитывая связь скоростей объемных УВ с коэффициентами функции распределения ориентировок (ФРО) [7] для ортотропного материала, можно записать:

$$V_{zx}^2 = \mu(\psi) / \rho(\psi) - c(\psi) \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_4^{00} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_4^{20} \right) \frac{1}{\rho(\psi)}; \quad (3)$$

$$V_{zy}^2 = \mu(\psi) / \rho(\psi) - c(\psi) \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_4^{00} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_4^{20} \right) \frac{1}{\rho(\psi)}; \quad (4)$$

$$V_{zz}^2 = \left(K(\psi) + \frac{4\mu(\psi)}{3} \right) / \rho(\psi) + \frac{32}{35} \sqrt{2} \pi^2 W_4^{00} c(\psi) / \rho(\psi); \quad (5)$$

Здесь W_4^{20} , W_4^{00} коэффициенты ФРО; $c = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}$, c_{ij} – упругие константы кубической кристаллической решетки поликристаллического материала.

Коэффициенты Пуассона ν_{zx} , ν_{zy} с учетом уравнений (3)-(5) приобретают вид:

$$\nu_{zx} = \frac{K(\psi) - 2\mu(\psi) / 3 + (32/35)\pi^2 c(\psi) (2\sqrt{2}W_4^{00} - \sqrt{5}W_4^{20})}{2 \left[K(\psi) + \mu(\psi) / 3 + (16/35)\pi^2 c(\psi) (3\sqrt{2}W_4^{00} - \sqrt{5}W_4^{20}) \right]}; \quad (6)$$

$$\nu_{zy} = \frac{K(\psi) - 2\mu(\psi) / 3 + (32/35)\pi^2 c(\psi) (2\sqrt{2}W_4^{00} + \sqrt{5}W_4^{20})}{2 \left[K(\psi) + \mu(\psi) / 3 + (16/35)\pi^2 c(\psi) (3\sqrt{2}W_4^{00} + \sqrt{5}W_4^{20}) \right]}$$

Другой параметр, величина которого определяется с помощью объемных УВ при одностороннем доступе к плоским элементам конструкции или близким к ним, – это параметр акустической анизотропии A [8]:

$$A_2 = (V_1^2 - V_2^2) / \sum V_i^2, \quad (7)$$

где k – коэффициент.

Параметр акустической анизотропии в первую очередь зависит от изменения кристаллографической текстуры, в гораздо меньшей степени – от изменения модулей упругости в результате накопления структурных повреждений в материале. Коэффициенты Пуассона зависят как от накопленной микроповрежденности, так и от текстуры материала.

Выражения (3)-(5) записаны для однофазных материалов или материалов с малым со-

держанием дополнительных фаз. Исследуемый материал имеет сложный химический и фазовый состав. Кроме того, при циклическом упругопластическом нагружении этой стали наблюдаются аллотропические изменения [9]. Они вносят дополнительный вклад в изменение акустических характеристик.

Можно указать основные процессы, влияющие на изменение акустических параметров стали 08X18H10T при усталостном разрушении (длинноволновое приближение):

- 1) накопление микрповреждений (вакансий, дислокаций, микропор, микротрещин);
- 2) формирование кристаллографической текстуры;
- 3) аллотропические изменения (мартенситное превращение $\gamma \rightarrow \epsilon$). Гамма железо (γ -железо) превращается в мартенсит ϵ (пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе).

Экспериментальная часть

Для проведения исследований использовались образцы круглого сечения из стали 08X18H10T (химический состав: С не более 0,08%, Si не более 0,8%, Mn не более 2%, Cr 17-19%, Ni 9-11%, Ti $5 \cdot C - 0,7$, S не более 0,02%, P не более 0,035%, Cu не более 0,3%, основа – железо), которая широко применяется в машиностроении при изготовлении сварной аппаратуры, работающей в средах повышенной агрессивности (растворах кислот, щелочей и солей), теплообменников, труб, деталей печной арматуры и других элементов. На образцах круглого сечения (с диаметром рабочей зоны 12 мм) в центре были вырезаны площадки 3×30 мм для установки пьезоэлектрических преобразователей (рис.1), каждая из которых была разбита на несколько зон.

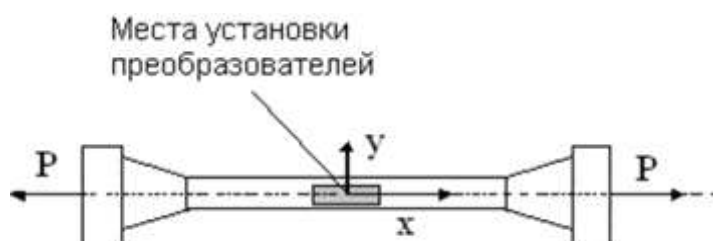


Рис.1. Схема нагружения образцов

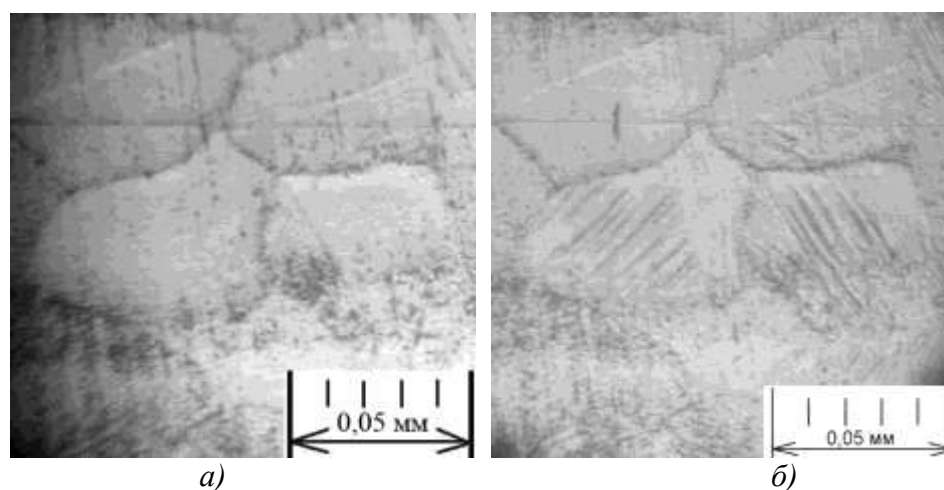
Шесть образцов подвергалась циклическому деформированию, при котором задавалась амплитуда деформации $\Delta \epsilon'$, включающая пластическую и упругую составляющие. Частота нагружения – около 3 Гц. Ещё один образец был исследован при статическом нагружении.

Для измерения акустических параметров использовалась переносная акустическая установка, состоящая из генератора зондирующих сигналов, высокочастотного усилителя, цифрового осциллографа PC SCOPE 1000VS и ПК. Используемый метод – эхоимпульсный. Центральная частота пьезоэлектрических преобразователей ~ 5 МГц. Диаметр преобразователей для возбуждения продольных и поперечных волн составлял 8 мм. Точность измерения времени распространения УВ – около 2-3 нс, точность измерения скорости – 5 м/с. Испытания проводились при комнатной температуре. Погрешность измерения коэффициента Пуассона с помощью акустических измерений составляет $7 \cdot 10^{-4}$, погрешность измерения величины акустической анизотропии $5 \cdot 10^{-4}$.

Микропластические деформации образцов определялись путем измерения расстояний между точками пересечения условной опорной линии с границами зерен материала (средний диаметр зерна материала $\bar{d} \approx 24$ мкм, наблюдалась высокая разнотельность) до и после усталостного нагружения. Микропластические деформации E измерялись как вдоль (E_x), так и поперек (E_y) направления нагружения материала. Погрешность измерения микропластических деформаций составляла 0,15%.

Результаты и их обсуждение

В общем случае процесс усталости связан с постепенным накоплением и взаимодействием дефектов кристаллической решетки (вакансий, междоузельных атомов, дислокаций и дисклинаций, двойников, границ блоков и зерен и т.д.) и, как следствие этого, с развитием усталостных повреждений в виде образования и распространения микро- и макроскопических трещин. В процессе циклического нагружения происходит образование устойчивых полос скольжения, в которых, как правило, формируются микротрещины [10], и двойников, в вершинах и на границах которых происходит зарождение микротрещин [11].



**Рис. 2. Фотографии микрошлифа образца, испытанного при амплитуде деформации $\Delta\varepsilon' = 0,33\%$:
а – до нагружения; б – после 1500 циклов нагружения (увеличение $200\times$)**

На рис. 2 приведены фотографии микрошлифа образца, испытанного при амплитуде деформации $\Delta\varepsilon' = 0,33\%$, до нагружения (рис. 2, а) и после количества циклов нагружения, равного 1500 (рис. 2, б), всего количество циклов до появления макротрещины 15000. На рис. 2, б можно отчетливо наблюдать полосы скольжения.

Связь упругопластической циклической деформации с изменением упругих свойств материала

В результате эксперимента были получены зависимости коэффициентов Пуассона ν_{zx} , ν_{zy} , величины акустической анизотропии A , измеренных с помощью акустических параметров, а также зависимости значений микропластических деформаций от количества циклов нагружения N .

На рис. 3, а, б представлены изменения коэффициентов Пуассона $\Delta\nu_{zx}$ и $\Delta\nu_{zy}$ соответственно, а на рис. 3, в, г – изменение параметра акустической анизотропии и абсолютное значение микропластических деформаций E_y , измеренных поперёк оси нагружения, в зависимости от накопленной пластической деформации $\varepsilon_{pl} = \sum_{i=1}^N \varepsilon_{pl}^i$, где N – количество циклов нагружения; ε_{pl}^i – амплитуда пластической деформации i -го цикла.

Из рис. 3 видно, что при наибольшей амплитуде деформации происходят наиболее интенсивные изменения, как параметра акустической анизотропии (рис. 3, в), так и коэффициентов Пуассона (рис. 3, а, б), что объясняется активным изменением кристаллографической текстуры при больших амплитудах упругопластической деформации. При максимальной амплитуде деформации ($\Delta\varepsilon' = 0,77\%$) наблюдается минимальное изменение коэффициен-

та Пуассона $\Delta\nu_{zx}$ (рис. 3, а). По-видимому, это связано с тем, что в данном случае влияние текстуры на коэффициент Пуассона компенсируется изменением поврежденности. Абсолютное значение микропластических деформаций, измеренных поперёк оси нагружения, при исчерпании ресурса материала выходит на некоторое постоянное значение для всех образцов, испытанных на усталость.

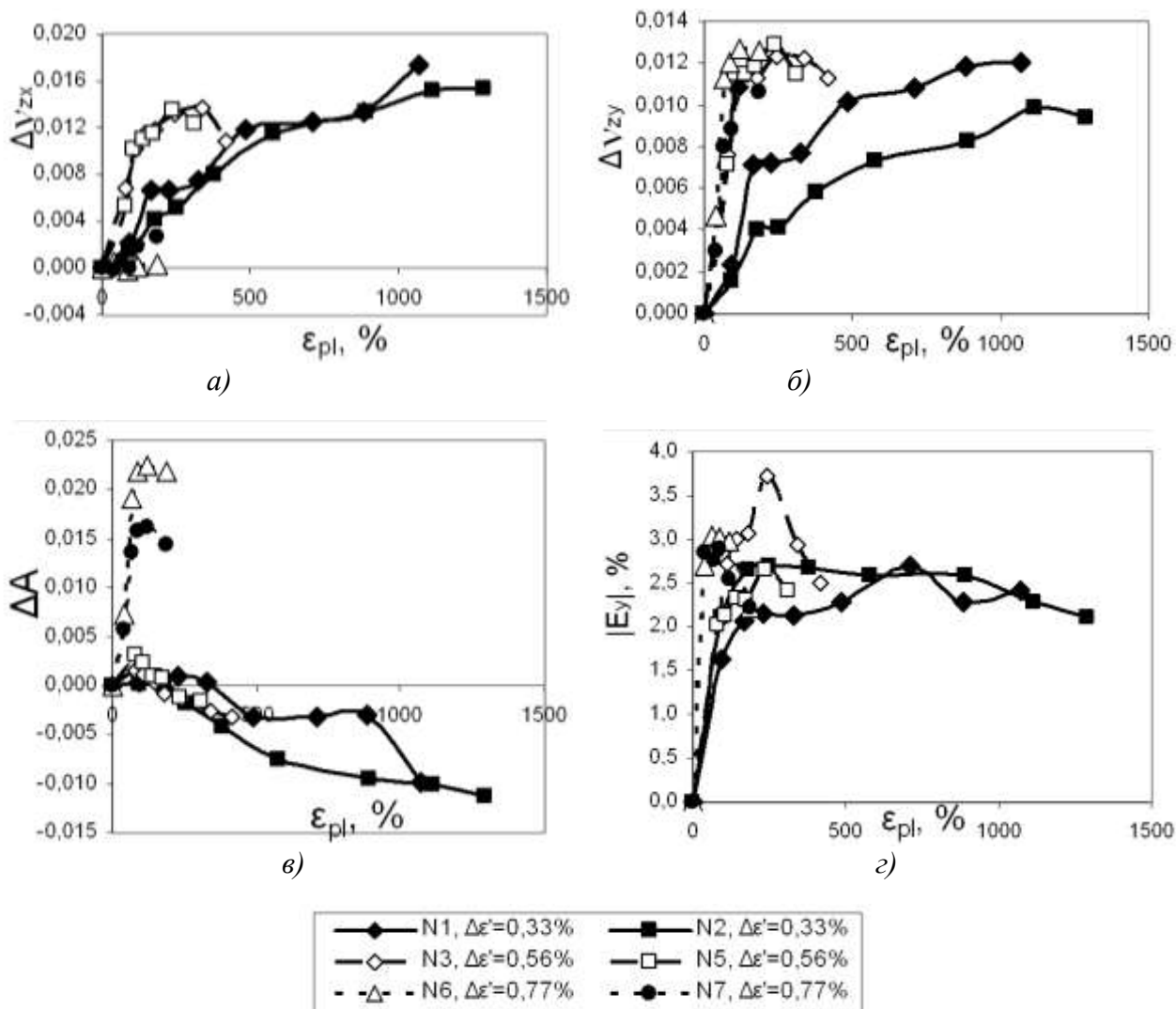


Рис. 3. Зависимости от величины накопленной пластической деформации:
 а – изменение коэффициента Пуассона $\Delta\nu_{zx}$; б – изменение коэффициента Пуассона $\Delta\nu_{zy}$;
 в – изменение параметра акустической анизотропии; г – абсолютное значение микропластической деформации, измеренной поперёк оси нагружения

Определение состояния материала по данным акустических измерений

На рис. 4 приведены зависимости между изменениями коэффициентов Пуассона ν_{zx} и ν_{zy} , полученные с помощью акустического метода для образцов, подвергнутых циклическому нагружению.

Как видно из рис. 4, связь $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$, хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Угол наклона кривой $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$ определяется амплитудой деформации $\Delta\epsilon'$. Для максимальной амплитуды он минимален.

Эксперимент показал, что длина L кривой $\nu_{zx}(\nu_{zy})$ в момент появления макротрещины остается приблизительно постоянной для разных амплитуд циклической деформации. По мере исчерпания ресурса материала длина кривой растет, достигая критического значения L^* .

Кривую $v_{zx}(v_{zy})$ предлагается использовать для оценки степени деградации материала акустическим методом на ранних стадиях разрушения до появления макротрещины. Введем параметр Π для оценки состояния материала, который определяется как

$$\Pi = \frac{\bar{L}_0}{\bar{L}^* + f(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy})},$$

где \bar{L}_0 – средняя длина кривой $v_{zx}(v_{zy})$, в момент появления макротрещины $L = (\Delta v_{zx}^2 + \Delta v_{zy}^2)^2$; \bar{L}^* – среднее значение длины кривой для критических величин Δv_{zx}^* и Δv_{zy}^* , $\bar{L}^* = 0,016$; $f(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy})$ – некоторая корректирующая длину кривой функция, которая зависит от угла наклона кривой, характеризуемого соотношением $(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy})$:

$$f(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}) = k_0 + k_1(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}) + k_2(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy})^2,$$

k_0, k_1, k_2 – коэффициенты (в ходе эксперимента были получены следующие значения коэффициентов $k_0 = -0,0045$; $k_1 = 0,0047$, $k_2 = 0,0002$).

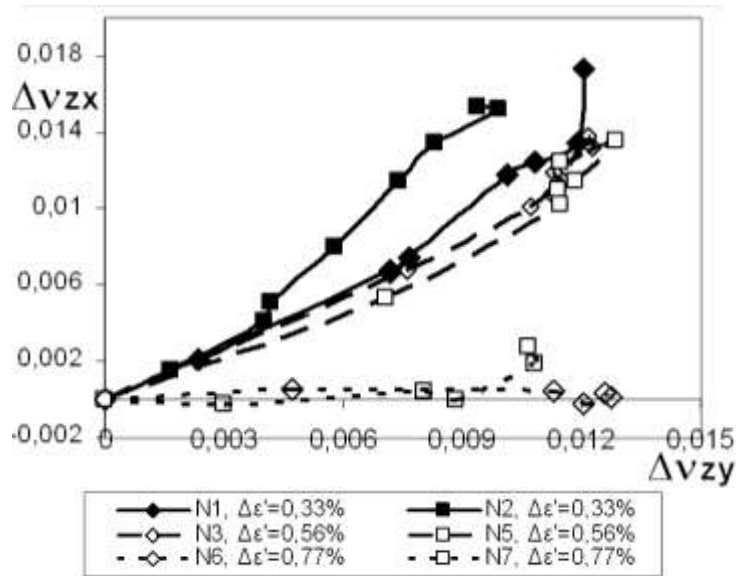


Рис. 4. Зависимости между изменениями коэффициентов Пуассона v_{zx} и v_{zy}

Зависимости параметра Π от количества циклов нагружения для образцов, испытанных при различных амплитудах деформации $\Delta\varepsilon'$, приведены на рис. 5.

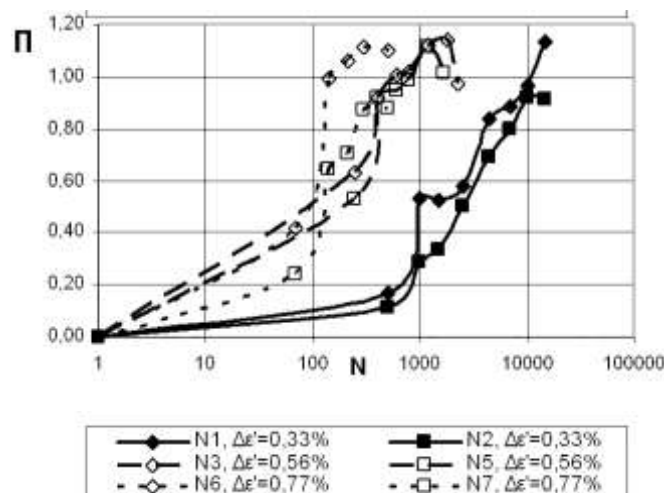


Рис. 5. Параметр Π в зависимости от количества циклов нагружения

Момент достижения значения параметра Π , близкого к единице, характеризуется появлением макродефекта.

Оценка поврежденности с помощью оптического и акустического методов

Особенностью разрушения при упругопластическом циклическом деформировании является то, что накопление микрповреждений происходит в областях материала с повышенной микропластической деформацией [4]. Плотность участков S , в которых происходит локализация микропластических деформаций, будем определять как отношение количества микроочагов (зерен) с повышенной деформацией (абсолютные значения деформации E зерна выше 0,3%) к общему количеству наблюдаемых зон N_z , $S = \frac{n}{N_z}$.

Следует отметить, что величина S зависит не только от степени повреждения материала, но и точности измерения микропластических деформаций. При достаточной точности измерения микропластических деформаций и устойчивой регистрации этих изменений, S можно использовать для оценки ресурса материала. Отношение $\Delta v_{zy}/S$ показывает интенсивность структурных изменений в “слабых зонах”, то есть в микрizonaх, подверженных накоплению микрповреждений. Отношение изменения коэффициента Пуассона Δv_{zy} к параметру S в зависимости от количества циклов для образцов, подвергнутых циклическому нагружению, приведено на рис. 6.



Рис. 6. Отношение изменения коэффициента Пуассона к параметру S в зависимости от количества циклов нагружения

Как видно из рис. 6, при снижении амплитуды деформации до 0,33%, количество циклов нагружения до появления макротрещины увеличивается до 10^4 и более циклов, то есть происходит переход из области малоциклового усталости (МЦУ) в область многоциклового усталости (МнЦУ). Экспериментальные исследования показали, что измерение отношения продольного и поперечного коэффициентов Пуассона $\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}$ и среднего абсолютного значения микропластических деформаций $\overline{E_x}$ позволяет определить, в какой области материал подвергался нагружению. На рис. 7 дана связь отношения $\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}$ и среднего абсолютного значения микропластических деформаций $\overline{E_x}$.

Как видно из рис. 7, соотношение этих величин дает четкое разделение данных для образцов, испытанных при МЦУ и МнЦУ.

Из рис. 6 следует, что область накопления рассеянной поврежденности отделяется от области появления макротрещины прямой линией. Значение $\Delta v_{zy}/S$ в момент образования

трещины выражается через отношение изменения коэффициентов Пуассона следующим образом:

$$\left(\frac{\Delta \nu_{zy}}{S}\right)^* = k_{S0} + k_{S1} \left(\frac{\Delta \nu_{zx}}{\Delta \nu_{zy}}\right)^* \tag{8}$$

где $(\Delta \nu_{zy}/S)^*$ и $(\Delta \nu_{zx}/\Delta \nu_{zy})^*$ определяются при критических значениях величин S ; $\Delta \nu_{zx}$ и $\Delta \nu_{zy}$, k_{S0} , k_{S1} – коэффициенты ($k_{S0} = 0,02$; $k_{S1} = -0,004$).

Поврежденность, рассчитанную по данным акустических и оптических измерений, можно представить в виде

$$\psi = \frac{\Delta \nu_{zx}/S}{(\Delta \nu_{zx}/S)^*} \tag{9}$$

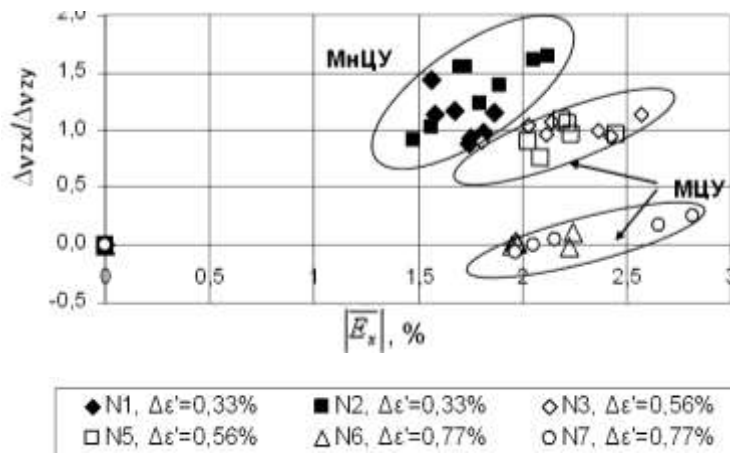


Рис. 7. Зависимость отношения продольного и поперечного коэффициентов Пуассона $\Delta \nu_{zx}/\Delta \nu_{zy}$ от среднего абсолютного значения микропластических деформаций

График поврежденности, рассчитанной по формуле (9), в зависимости от количества циклов нагружения, показан на рис. 8.

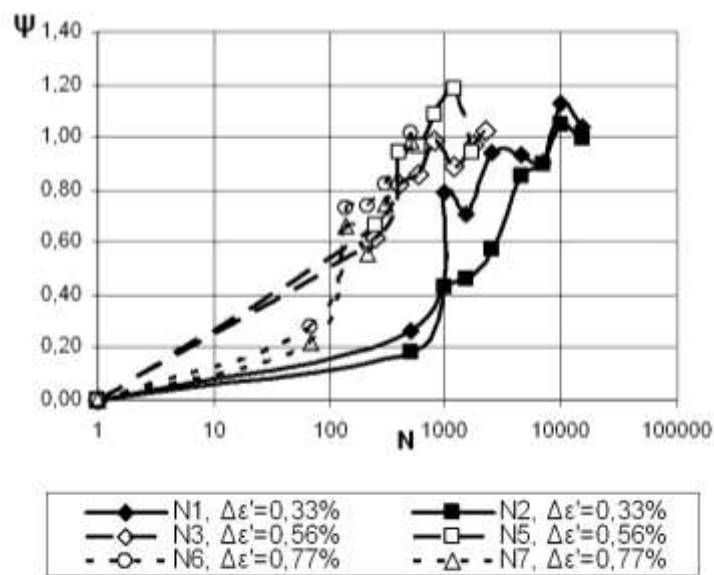


Рис. 8. График поврежденности, рассчитанной по формуле (9), в зависимости от количества циклов нагружения

Определение поврежденности с привлечением измерения параметров микропластических деформаций в целом подтверждается оценкой состояния материала с помощью акустических измерений (рис. 5).

Алгоритм оценки поврежденности по данным статических испытаний и акустических измерений

Экспериментальные исследования показали, что кривые $\Delta v_{zy}(\varepsilon_{plrel})$ (где ε_{plrel} – величина накопленной относительной деформации $\varepsilon_{plrel} = \varepsilon_{pl} / \varepsilon_{pl}^*$, ε_{pl}^* – критическое значение ε_{pl} , соответствующее деформации, при которой образуется шейка) для статических испытаний и испытаний в области усталости близки при указанных выше условиях нагружения (рис. 9). Исходя из этого, можно грубо оценить величину поврежденности в области МЦУ, используя данные статических испытаний. Для этого при проведении статических испытаний определяются параметр v_{zy} и величина накопленной относительной деформации ε_{plrel} . Затем проводится аппроксимация $\varepsilon_{plrel}(\Delta v_{zy})$ с помощью выражения $\varepsilon_{plrel} = k_{1\varepsilon} + k_{2\varepsilon} \Delta v_{zy} + k_{3\varepsilon} (\Delta v_{zy})^2$, определяются коэффициенты $k_{1\varepsilon} = 0,1$; $k_{2\varepsilon} = 67,5$; $k_{3\varepsilon} = -788,2$; которые далее используются для расчёта поврежденности образцов, испытанных на усталость.

Исходя из деформационных критериев поврежденности [12], формулу для ее определения можно записать как: $\psi_\varepsilon = \varepsilon_{pl} / \varepsilon_{pl}^*$.

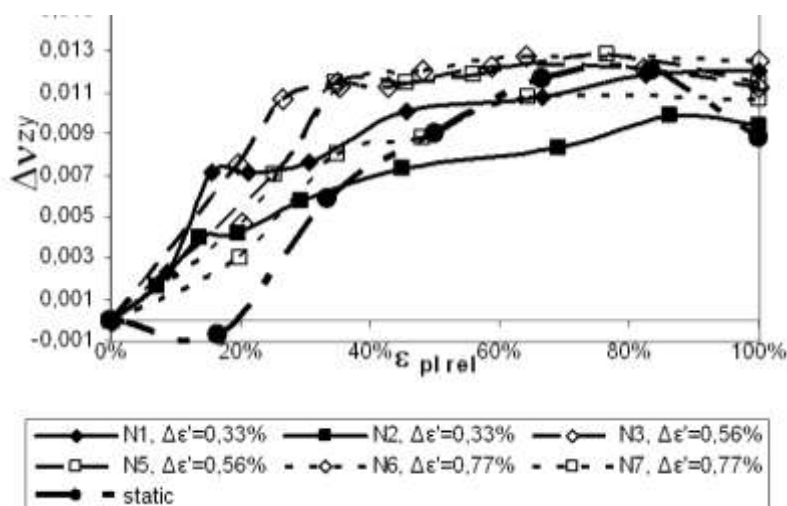


Рис. 9. Изменение значения коэффициента Пуассона Δv_{zy} в зависимости величины относительной накопленной деформации

Определение поврежденности ψ_ε производится по алгоритму, включающему данные статических испытаний:

$$\psi_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{pl}^*} = k_{1\varepsilon} + k_{2\varepsilon} \Delta v_{zy} + k_{3\varepsilon} (\Delta v_{zy})^2 \quad (10)$$

где $0 \leq \psi_\varepsilon \leq 1$.

На рис. 10 представлены графики зависимости поврежденности, рассчитанной с использованием формулы (10), от количества циклов нагружения N .

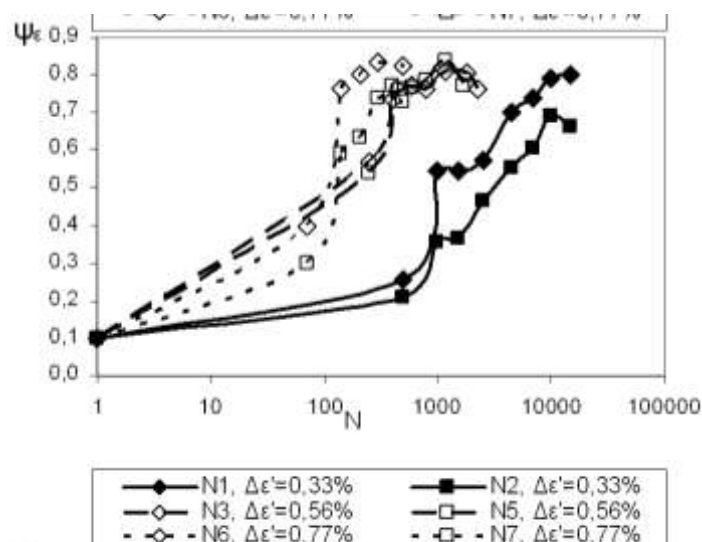


Рис. 10. Графики зависимости поврежденности, рассчитанной с использованием формулы (10), от количества циклов нагружения

Погрешность определения поврежденности составляет 20–30%

Использование данных статических испытаний существенно могут сократить время для определения величины поврежденности материала.

Выводы

Проведенные исследования показали существенное изменение акустических параметров стали 08X18H10T в процессе усталостного нагружения на ранней стадии разрушения до образования макротрещины. Получено, что в процессе исчерпания ресурса материала происходит изменение анизотропии упругих свойств исследуемого сплава, что можно объяснить активным формированием кристаллографической текстуры в процессе упругопластического циклического нагружения. Исследования также показали чувствительность коэффициентов Пуассона, измеренных с помощью акустического метода, к структурному состоянию материала и накоплению микроповреждений. Предложен алгоритм оценки степени деградации материала с помощью акустических измерений.

Также на базе оптических и акустических измерений предложен алгоритм определения поврежденности по данным величины микропластических деформаций и изменению коэффициента Пуассона.

Исходя из того, что кривые изменения коэффициента Пуассона в зависимости от относительной накопленной пластической деформации близки при нагружении в области малоциклового усталости и при статических испытаниях, предложен алгоритм оценки поврежденности материала с использованием данных статических испытаний. Такой подход существенно сокращает время для определения величины поврежденности материала методами НК.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-08-00892).

Авторы выражают благодарность за проведение механических испытаний образцов из стали 08X18H10T Д.Н. Шишулину и Д.А. Захарову.

Библиографический список

1. Митенков, Ф.М. Использование оптического и акустического методов контроля для оценки поврежденности сталей на ранних стадиях усталостного разрушения / Ф.М. Митенков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 12. С. 40–45.

2. **Mishakin, V.V.** The use of wide band ultrasonic signals to estimate the stress condition of materials / V.V. Mishakin, S. Dixon, M.G.D. Potter // J. Phys. D., 2006. V. 39. P. 4681–4687.
3. **Стрельников, В.П.** Приложение теории марковских процессов к исследованию усталостной долговечности // Проблемы прочности. 1986. №2. С. 13–17.
4. **Гурьев, А.В.** Роль микропластических деформаций в формировании частотной зависимости / А.В. Гурьев, А.П. Карпов // Проблемы прочности. 1986. №4. С. 24–27.
5. **Салганик, Р.Л.** Механика тел с большим числом трещин // Механика твердого тела. 1973. № 4. С. 149–158.
6. **Вавакин, А.С.** Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями / А.С. Вавакин, Р.Л. Салганик // Механика твердого тела. 1975. № 3. С. 65–76.
7. **Sayers, C. M.** Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157–2167.
8. **Мишакин, В.В.** Разработка акустического метода оценки поврежденности металлических сплавов до образования макротрещины / В.В. Мишакин [и др.] // Дефектоскопия. 2007. №10. С. 49–57.
9. Закономерности формирования и эволюции дислокационных субструктур в углеродистой стали при усталости в отожженном и закаленном состояниях / О.В. Соснин [и др.] // Изв. вузов. Сер. Физика. 2004. Т. 47. С. 32–37.
10. **Терентьев, В.Ф.** Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев; отв. ред. Н.П. Лякишев. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
11. Аналитическая оценка зарождения микротрещин в вершинах и на границах двойников в ОЦК и ГЦК металлах / В.А. Куранова [и др.] // Вестник Тамбовского ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки/ ТГУ. 2002. Т. 7. Вып. 1. С. 99.
12. **Кононов, К.М.** Критерии разрушения материалов при циклическом нагружении / К.М. Кононов, Л.Б. Гецов // Проблемы прочности. 1984. № 2. С. 81–85.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

V.A. Klyushnikov, V.V. Mishakin, N.V. Danilova

THE DAMAGE ESTIMATING OF 08CR18Ni10Ti STEEL IN THE EARLY STAGES OF FATIGUE LOADING USING NONDESTRUCTIVE METHODS

The results of the study of 08Cr18Ni10Ti steel subjected to fatigue failure by acoustic and optical control methods are presented. According to test results the correlations between the damage degree and both the acoustic characteristics and microplastic deformations' parameters defined by an optical method were obtained. The algorithm for damage estimating of the material in the early stages of fatigue failure was proposed on the base of acoustic and optical measurements data.

Key words: fatigue damage, nondestructive testing, acoustic parameters, optical method, microplastic characteristics, high-cycle and low cycle fatigue.