

Разработка акустического метода оценки степени деградации стали 08X18H10T на ранних стадиях усталостного разрушения*

В. В. Мишакин, Ф. М. Митенков, В. А. Ключников

Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

Создан алгоритм оценки степени деградации материала акустическим методом на стадии накопления структурной поврежденности. Приведены результаты акустических исследований стали 08X18H10T при усталостном разрушении.

Ключевые слова: акустические параметры, неразрушающий контроль, поврежденность, усталостное разрушение.

Современные подходы к оценке степени усталостного разрушения метастабильных сплавов основаны на определении кинетики фазовых превращений при циклическом деформировании. Существует корреляция между плотностью микротрещин и объемной долей кристаллов мартенсита, образующихся при усталостном нагружении [1], которые вносят дополнительный вклад в изменение упругих характеристик металлов.

Проведенные исследования [2, 3] показали, что структурно-чувствительные акустические параметры позволяют обнаруживать деградацию структуры материала задолго до образования макротрещины. Учитывая, что стадия накопления рассеянной поврежденности занимает до 80% ресурса материала, оценка его состояния на ранних стадиях разрушения имеет большое значение.

Известно, что при упругопластическом циклическом деформировании происходят сложные процессы структурных преобразований, которые приводят к изменению физических характеристик сплавов. Среди них можно выделить накопление микроповреждений (вакансии, дислокации, микропоры, микротрещины), изменение кристаллографической текстуры, аллотропические изменения (мартенситное превращение $\gamma \rightarrow \varepsilon - \alpha'$, представляющее собой бездиффузионный переход от парамагнитного аустенита γ -Fe, имеющего ГЦК-решетку, в ферромагнитный α' -мартенсит с тетрагонально-искаженной ОЦК-решеткой и/или парамагнитный ε -мартенсит с ГПУ-решеткой).

В качестве основных акустических параметров для проведения исследований стали 08X18H10T были выбраны скорости объемных упругих волн (УВ) (поперечные и продольные), а также соотношения этих скоростей или времени их распространения. Для элементов конструкций с односторонним доступом целесообразно использовать параметры, которые выражаются через соотношение времени распространения волн, так как в этом случае нет необходимости измерять длину акустического пути (толщину элемента). При определении, например, скорости УВ основную погрешность дает измерение длины акустического пути. Такими параметрами для ортотропных материалов (в частности, катаные листы, уголки, швеллеры и другие изделия проката) являются коэффициенты Пуассона ν_{zx} и ν_{zy} , измеренные вдоль и поперек направления проката соответственно, которые определяются по выражениям [4]

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

* Доклад на Международной научно-технической конференции "Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций" (Киев, 2013).

где V_{zi} и τ_{zi} ($i = x, y$) – скорость и время распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль соответствующих осей ортотропного материала; V_{zz} и τ_{zz} – скорость и время распространения продольных УВ. Направление распространения УВ перпендикулярно плоскости проката материала.

Еще одним параметром, величина которого определяется с помощью объемных УВ при одностороннем доступе к плоским элементам конструкций или близким к ним, является параметр акустической анизотропии A [4]:

$$A = \frac{2(V_{zx} - V_{zy})}{(V_{zx} + V_{zy})} = \frac{2(\tau_{zy} - \tau_{zx})}{(\tau_{zy} + \tau_{zx})}. \quad (2)$$

Разрыхление материала, или структурная поврежденность ψ , образовавшаяся вследствие накопления трещин, влияет на модуль Юнга и коэффициент Пуассона [5, 6]:

$$E = E_0(1 - k_E\psi), \quad \nu = \nu_0(1 - k_\nu\psi), \quad (3)$$

где $\psi = n\bar{a}^3 \approx (\rho_0 - \rho)/\rho_0$; ρ_0 и ρ – плотности материала до и после образования микропор, микротрещин.

Закон изменения модулей упругости M при выделении дополнительной фазы можно записать в виде [7]

$$M^{-1} = (1 - V_m)M_\gamma^{-1} + V_m M_m^{-1}, \quad (4)$$

где M_γ – модули упругости матрицы; M_m и V_m – модули упругости и объемная доля выделившейся фазы.

В процессе циклического деформирования происходит как накопление микродефектов, так и увеличение объемной доли выделившейся фазы. В работе [8] показано, что зависимость изменения доли магнитной фазы (мартенсита) от накопленной пластической деформации в стали X6CrNiTi1810 (аналог стали 08X18H10T) близка к линейной.

Накопление микропор и микротрещин приводит к уменьшению модулей упругости и скорости УВ, с увеличением объемной доли выделившейся фазы (при $M_m > M_\gamma$) скорость УВ возрастает. Эти, как минимум, два конкурирующих процесса влияют на упругие характеристики.

Было проведено два эксперимента. Для исследований при регулярном режиме нагружения использовали шесть образцов круглого сечения из стали, имеющей следующий химический состав (%) [9]: не более 0,08 С, не более 0,8 Si, не более 2 Mn, 17...19 Cr, 9...11 Ni, (5 С – 0,7) Ti, не более 0,02 S, не более 0,035 P, не более 0,3 Cu, основа – железо. Образцы были разделены на три группы, каждую из которых испытывали при одной из трех амплитуд деформации $\Delta\epsilon'$. Для проведения исследований при блочном режиме нагружения было испытано четыре группы образцов при следующих режимах нагружения: $0,33 \rightarrow 0,77\%$; $0,77 \rightarrow 0,33\%$; $0,77 \rightarrow 0,33 \rightarrow 0,56\%$; $0,33 \rightarrow 0,56 \rightarrow 0,77\%$.

На образцах (диаметр рабочей части 12 мм) в центре были вырезаны площадки (3×30 мм) для установки пьезоэлектрических преобразователей.

Образцы подвергались циклическому деформированию при общей амплитуде деформации $\Delta\epsilon'$, включающей пластическую и упругую составляющие. Частота нагружения равна примерно 3 Гц.

Для измерения акустических параметров эхо-импульсным методом использовалась переносная акустическая установка, состоящая из генератора зондирующих сигналов, высокочастотного усилителя, цифрового осциллографа PC SCOPE 1000VS

и персонального компьютера. Центральная частота пьезоэлектрических преобразователей составляет ~ 5 МГц. Диаметр преобразователей для возбуждения продольных и поперечных волн равен 8 мм, погрешность измерения времени распространения УВ – около 2–3 нс, погрешность измерения скорости – 5 м/с. Испытания проводились при комнатной температуре. Погрешность измерения коэффициентов Пуассона составляет $7 \cdot 10^{-4}$.

На рис. 1 представлена зависимость изменения коэффициентов Пуассона от числа циклов нагружения.

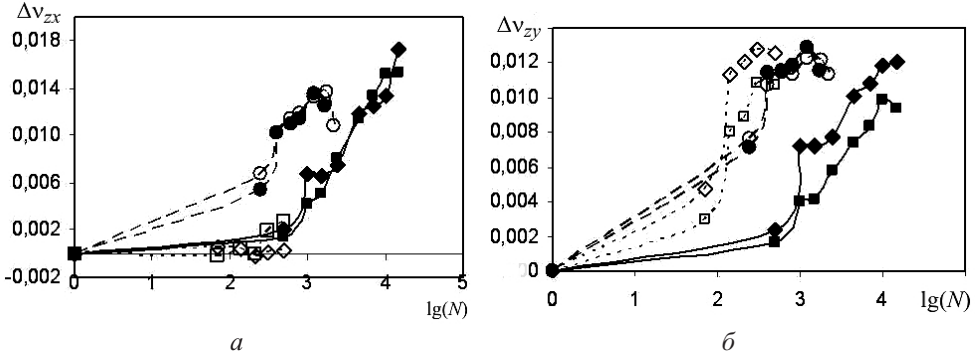


Рис. 1. Изменение коэффициентов Пуассона $\Delta\nu_{zx}$ и $\Delta\nu_{zy}$ в зависимости от числа циклов нагружения: *a* – поляризация поперечных УВ вдоль оси нагружения; *б* – то же поперек оси нагружения. (Здесь и на рис. 2: \blacklozenge – образец N1, $\Delta\varepsilon' = 0,33\%$; \blacksquare – N2, $\Delta\varepsilon' = 0,33\%$; \circ – N3, $\Delta\varepsilon' = 0,56\%$; \bullet – N4, $\Delta\varepsilon' = 0,56\%$; \diamond – N5, $\Delta\varepsilon' = 0,77\%$; \square – N6, $\Delta\varepsilon' = 0,77\%$.)

Отметим, что значения $\Delta\nu_{zx}$ и $\Delta\nu_{zy}$ при различных амплитудах деформирования увеличиваются. Это обусловлено тем, что при аллотропическом превращении выделяется фаза, модули упругости которой выше, чем у матрицы материала.

Рис. 2 иллюстрирует взаимосвязь между изменениями коэффициентов Пуассона $\Delta\nu_{zx}$ ($\Delta\nu_{zy}$), полученную с помощью акустических измерений. Кривые разделяются при различных уровнях амплитуды деформации $\Delta\varepsilon'$.

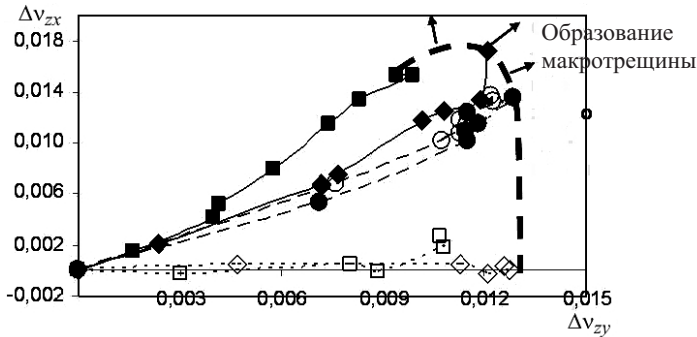


Рис. 2. Взаимосвязь между изменениями коэффициентов Пуассона $\Delta\nu_{zx}$ и $\Delta\nu_{zy}$.

Как видно из рис. 2, связь между $\Delta\nu_{zx}$ и $\Delta\nu_{zy}$ хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Угол наклона кривой $\Delta\nu_{zx}$ ($\Delta\nu_{zy}$) определяется амплитудой деформации $\Delta\varepsilon'$. Для максимальной амплитуды он минимален.

Данные эксперимента показывают, что в момент появления макротрещины длина L кривой $\Delta\nu_{zx}$ ($\Delta\nu_{zy}$) остается приблизительно одинаковой при разных амплитудах циклического деформирования. По мере исчерпания ресурса материала длина L

растет, достигая критического значения L^* . Кривую $\Delta v_{zx}(\Delta v_{zy})$ предлагается использовать для оценки степени деградации материала акустическим методом на ранних стадиях разрушения до появления макротрещины. Предложенный параметр деградации Π для оценки состояния материала записывается как

$$\Pi = \frac{L}{L_p^*}. \tag{5}$$

Макротрещина появляется в случае если $L \geq L^*$. Длина L рассчитывается по формуле

$$L = \sum_i L^i, \tag{6}$$

где $L^i = \sqrt{(L_{zx}^i)^2 + (L_{zy}^i)^2}$; $L_{zx}^i = L_{zx}^{i-1} + |\Delta v_{zx}^i - \Delta v_{zx}^{i-1}|$; $L_{zy}^i = L_{zy}^{i-1} + |\Delta v_{zy}^i - \Delta v_{zy}^{i-1}|$; $\Delta v_{zx}^i = v_{zx}^i - v_{zx}^{i-1}$; $\Delta v_{zy}^i = v_{zy}^i - v_{zy}^{i-1}$; i – номер измерения, $i = 1, \dots, n$; n – количество измерений; $L_{zx}^0 = L_{zy}^0 = \Delta v_{zx}^0 = \Delta v_{zy}^0 = 0$.

Значение L^* предлагается рассчитывать следующим образом:

$$L_p^* = a + b(\operatorname{tg} \varphi). \tag{7}$$

Коэффициенты a и b определяются с использованием множественной регрессии, $a = 0,0128$, $b = 0,0065$. Тангенс угла наклона φ кривой L рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L_{zx}^i}{L_{zy}^i}. \tag{8}$$

При изменении наработки N/N^* величина Π монотонно изменяется с интенсивностью, зависящей от величины амплитуды нагрузки, которая влияет на соотношение $\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}$, т.е. изменяется угол φ .

Представим наработку как функцию $N/N^* = f(\Pi, \varphi)$.

Для регулярного режима наработку можно определить с помощью выражения

$$\left(\frac{N}{N^*}\right)_p = k_{1\Pi}\Pi + k_{2\Pi}\operatorname{tg} \varphi + k_{3\Pi}\Pi^2 + k_{4\Pi}\operatorname{tg}^2 \varphi + k_{5\Pi}\Pi \operatorname{tg} \varphi, \tag{9}$$

где $k_{1\Pi} = 0,679$; $k_{2\Pi} = -0,025$; $k_{3\Pi} = 0,183$; $k_{4\Pi} = 0,0016$; $k_{5\Pi} = -0,054$.

Рис. 3 иллюстрирует связь наработки с параметром Π и корреляционное поле расчетного и экспериментального соотношения N/N^* .

Связь наработки N/N^* с параметрами Π и φ для блочного режима нагружения предлагается определять с помощью множественной регрессии по формуле

$$\sum \left(\frac{N_i}{N_i^*}\right)_p = k_{1\Pi}\Pi + k_{2\Pi}\operatorname{tg} \varphi + k_{3\Pi}\Pi^2 + k_{4\Pi}\operatorname{tg}^2 \varphi + k_{5\Pi}\Pi \operatorname{tg} \varphi, \tag{10}$$

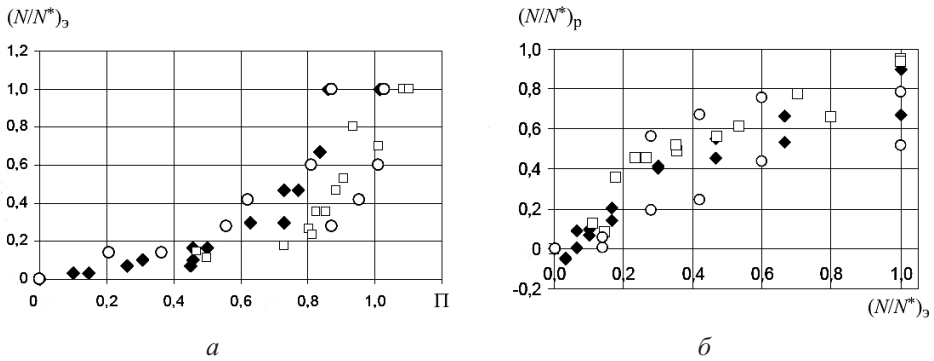


Рис. 3. Связь $(N/N^*)_3$ с параметром Π (а) и $(N/N^*)_p$ с $(N/N^*)_3$ (б) для регулярного режима нагружения: \blacklozenge – $\Delta\epsilon' = 0,33\%$; \square – $\Delta\epsilon' = 0,56\%$; \circ – $\Delta\epsilon' = 0,77\%$.

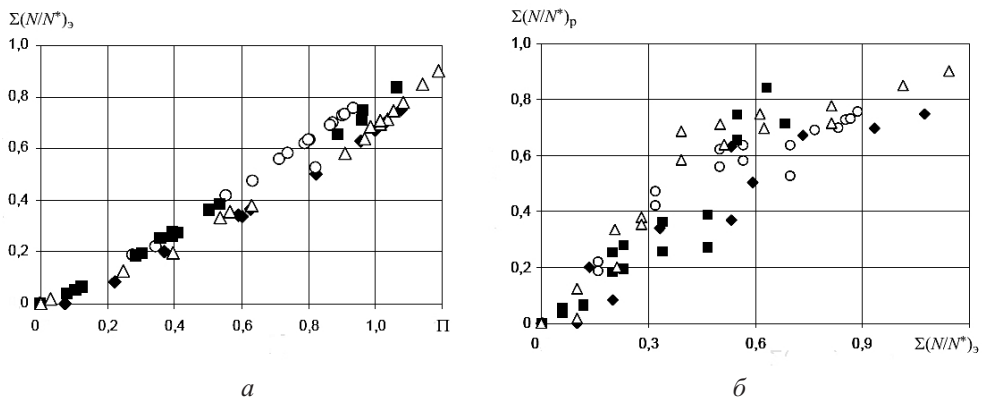


Рис. 4. Связь $\sum(N/N^*)_3$ с параметром Π (а) и $\sum(N/N^*)_p$ с $\sum(N/N^*)_3$ (б) для блочного режима нагружения: \blacklozenge – $0,33 \rightarrow 0,77\%$; \circ – $0,77 \rightarrow 0,33\%$; \blacksquare – $0,77 \rightarrow 0,33 \rightarrow 0,56\%$; \triangle – $0,33 \rightarrow 0,56 \rightarrow 0,77\%$.

где N_i^* – критическое число циклов нагружения при i -й амплитуде; N_i – число циклов нагружения при i -й амплитуде.

Зависимости параметра Π от наработки для блочного режима нагружения приведены на рис. 4.

Коэффициент корреляции между расчетным и экспериментальным значением $\sum(N/N^*)_3$ составляет примерно 0,9.

Момент достижения близкого к единице значения параметра Π характеризуется появлением макротрещины. Образование фазы (мартенсита) при циклическом деформировании непосредственно связано с разрушением материала на микроуровне [10]. Концентрация напряжений в местах соединения выделившихся жестких частиц с матрицей приводит к образованию микротрещин и дальнейшему разрушению сплава. Изменение модулей, в том числе коэффициента Пуассона, обусловлено увеличением концентрации и размера этих частиц, что позволяет по изменению $\Delta\nu_{zx}$ и $\Delta\nu_{zy}$ косвенно судить о степени деградации материала. Исследования проводились в области малоциклового усталости. Таким образом, в результате исследований разработан алгоритм оценки степени деградации стали 08X18H10T на ранней стадии усталостного разрушения, основанный на определении с помощью акустического

эхо-импульсного метода коэффициентов Пуассона ν_{zx} и ν_{zy} , их соотношения и длины кривой $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$ относительно ее критического значения.

Резюме

Розроблено алгоритм оцінки ступені деградації матеріалу акустичним методом на стадії накопичення структурної пошкоджуваності. Наведено результати акустичних досліджень сталі 08X18N10T при втомному руйнуванні.

1. Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов / Под ред. Н. П. Лякишева. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
2. Митенков Ф. М., Мишакин В. В., Пичков С. Н. и др. Использование оптического и акустического методов контроля для оценки поврежденности сталей на ранних стадиях усталостного разрушения // Завод. лаб. Сер. Диагностика материалов. – 2009. – № 12. – С. 60 – 65.
3. Мишакин В. В., Ключников В. А., Кассина Н. В. Исследование процесса разрушения сталей акустическим методом и методом делительных сеток // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 5. – С. 33 – 39.
4. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
5. Вавакин А. С., Салганик Р. Л. Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями // Механика твердого тела. – 1975. – № 3. – С. 65 – 76.
6. Салганик Р. Л. Механика тел с большим числом трещин // Там же. – 1973. – № 4. – С. 149 – 158.
7. Валиев Р. З., Александров И. В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2007. – 398 с.
8. Nebel Th. and Eifler D. Cyclic deformation behaviour of austenitic steels at ambient and elevated temperatures // Sadhana. – 2003. – 28, Issue 1-2. – P. 187 – 208.
9. Сорокин В. Г., Волосникова А. В., Вяткин С. А. и др. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
10. Соснин О. В., Громова А. В., Козлов Э. В. и др. Закономерности эволюции дислокационных субструктур в сталях при усталости // Вестн. СГТУ. Сер. Физ.-мат. науки. – 2004. – 27. – С. 185 – 192.

Поступила 14. 11. 2013