УДК 620.179.16

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ДЕГРАДАЦИИ СТАЛИ 08Х18Н10Т АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА РАННИХ СТАДИЯХ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

© Василий Васильевич Мишакин, Федор Михайлович Митенков, Наталья Васильевна Данилова, Вячеслав Александрович Клюшников

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Нижний Новгород, Россия

imndt31@mts-nn.ru

Аннотация. *Статья посвящена исследованию акустическим методом процесса усталостного разрушения стали 08Х18Н10Т. Предложен алгоритм оценки величины деградации стали на стадии накопления структурной поврежденности, до образования макротрещины.*

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

The estimation of the degradation Value of 321 steel by the acoustic method at an early stage of fatigue failure

V.V. Mishakin, F.M. Mitenkov, N.V. Danilova, V.A. Klyushnikov

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

Annotation. *The article presents the results of acoustic research of 321 steel under fatigue failure. The algorithm for estimation of the degradation value of the steel at the stage of structural damage accumulation before macrocrack formation was proposed.*

Key words: *acoustic parameters, non-destructive testing, fatigue failure, degradation of the steel.*

Проведенные исследования [1, 2] 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 состояния материала на ранних стадиях разрушения имеет большое значение.

При пластическом деформировании и усталостном разрушении, можно выделить два основных фактора, влияющих на акустические характеристики материала. Первый – это изменение кристаллографической текстуры, которое на макроуровне приводит к изменению упругой анизотропии материала и, следовательно, к изменению акустической анизотропии [3]. Второй фактор – это изменение микронеоднородности при разрушении материалов, связанное с накоплением микропор, микротрещин, изменением дислокационной структуры, плотности вакансий, изменением эффективных модулей упругости в локальных зонах из-за наличия микронапряжений и т. д. Эти процессы приводят к изменению энергии рассеяния, поглощения ультразвуковых волн [4, 5, 6] и скорости волн.

Для элементов конструкций, имеющих односторонний доступ, целесообразно использовать акустические параметры, выражающиеся через соотношение времени

распространения, так как в этом случае не надо измерять длину акустического пути (толщину элемента). Такими параметрами для ортотропных материалов (к ортотропным материалам относятся, 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 выражениями:

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

где V_{zi} и τ_{zi} – скорость и время распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль соответствующих осей ортотропного материала, V_{zz} и τ_{zz} – скорость и время распространения продольной УВ. Направление распространения упругих волн перпендикулярно плоскости проката материала.

Другим параметром, величина которого определяется с помощью объемных УВ при одностороннем доступе к плоским элементам конструкций или близким к плоским, является параметр акустической анизотропии A [7]:

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

Учитывая, что разрыхление материала за счет образования микропор, микротрещин влияет на модуль объемного сжатия K и модуль сдвига μ [8, 9]:

$$K = K_0 + k_{1\psi}\psi, \quad \mu = \mu_0 + k_{2\psi}\psi, \tag{3}$$

где $k_{1\psi}$ и $k_{2\psi}$ – коэффициенты, 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, а также, учитывая связь скоростей объемных УВ с коэффициентами функции распределения ориентировок (ФРО) кристаллов в поликристаллическом материале [10] для ортотропного материала, можно записать:

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

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

$$V_{zz}^2 = \left(K(\psi) + \frac{4\mu(\psi)}{3}\right)\Big/\rho(\psi) + \frac{32}{35}\sqrt{2}\pi^2 W_4^{00} c(\psi)/\rho(\psi); \tag{6}$$

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} и ν_{zy} с учетом уравнений (4)-(6) приобретают вид:

$$\nu_{zx} = \frac{K(\psi) - 2\mu(\psi)/3 + (32/35)\pi^2 c(\psi)\left(2\sqrt{2}W_4^{00} - \sqrt{5}W_4^{20}\right)}{2\left[K(\psi) + \mu(\psi)/3 + (16/35)\pi^2 c(\psi)\left(3\sqrt{2}W_4^{00} - \sqrt{5}W_4^{20}\right)\right]}; \tag{7}$$

$$\nu_{zy} = \frac{K(\psi) - 2\mu(\psi)/3 + (32/35)\pi^2 c(\psi)\left(2\sqrt{2}W_4^{00} + \sqrt{5}W_4^{20}\right)}{2\left[K(\psi) + \mu(\psi)/3 + (16/35)\pi^2 c(\psi)\left(3\sqrt{2}W_4^{00} + \sqrt{5}W_4^{20}\right)\right]}. \tag{8}$$

Учитывая выражения (2)-(6) и принимая во внимание малые изменения, как скорости ультразвука, так и плотности, вследствие разрыхления материала, можно записать:

$$A \approx kW_4^{20} \quad (9)$$

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

Выражения (4)–(6) записаны для однофазных материалов или материалов с малым содержанием дополнительных фаз. Многие конструкционные материалы имеют сложный химический и фазовый состав. Кроме того, при циклическом упругопластическом нагружении некоторых материалов наблюдаются аллотропические превращения [11]. Они вносят дополнительный вклад в изменение акустических характеристик.

Для акустических исследований была выбрана сталь 08Х18Н10Т, 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.

Таким образом, укажем основные процессы, влияющие на изменение акустических параметров стали 08Х18Н10Т при усталостном разрушении (длинноволновое приближение):

1) накопление микроповреждений (вакансий, дислокаций, микропор, микротрещин);

2) формирование кристаллографической текстуры;

3) аллотропические изменения (мартенситное превращение γ→ε). Гамма железо (γ–железо) превращается в мартенсит ε [11].

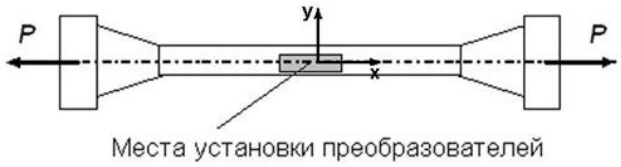


Рис. 1. Схема нагружения образцов.

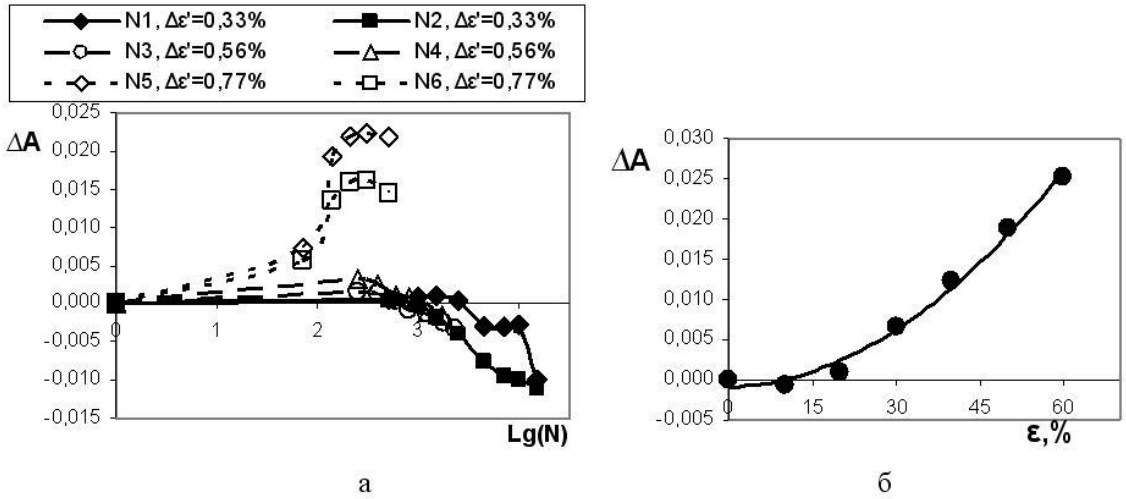
Для проведения исследований использовались 6 образцов круглого сечения (химический состав [12]: C не более 0,08%, Si не более 0,8%, Mn не более 2%, Cr 17-19%, Ni 9-11%, Ti 5xC-0,7, S не более 0,02%, P не более 0,035%, Cu не более 0,3%, основа – железо). Шесть образцов были разделены на 3 пары, каждую из которых испытывали при одной из трёх амплитуд деформации. На этих образцах (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.

Образцы подвергались циклическому деформированию, при котором задавалась общая амплитуда деформации $\Delta\varepsilon'$, включающая пластическую и упругую составляющие. Частота нагружения – около 3 Гц.

Для измерения акустических параметров использовалась переносная акустическая установка, состоящая из генератора зондирующих сигналов, высокочастотного усилителя, цифрового осциллографа PC SCOPE 1000VS и ПК. Используемый метод – эхо-импульсный. Центральная частота пьезоэлектрических преобразователей ~ 5 МГц. Диаметр преобразователей для возбуждения продольных и поперечных волн составлял 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 7×10^{-4}, акустической анизотропии – 5×10^{-4}.

В результате эксперимента были получены значения $\Delta\overline{A}$ (рис. 2) и изменения коэффициентов Пуассона ν_{zx} и ν_{zy} (рис. 3) в зависимости от количества циклов нагружения N ($\Delta\overline{A}$ – усредненное значение величины изменения параметра акустической анизотропии A в процессе нагружения, $\Delta A = A - A_0$, где A_0 и A – начальное и текущее значения анизотропии).



а б

Рис. 2. Изменение параметра акустической анизотропии в зависимости от количества циклов нагружения (а), от величины пластической деформации (б).

Различное поведение параметра $\Delta\overline{A}(N)$ (рис. 2) можно объяснить преобладающим влиянием тех или иных структурных изменений на акустические характеристики при смене амплитуды деформации.

Ранее проведенные исследования показали, что при значительных пластических деформациях сталей 20, 09Г2С, 08пс и стали 40 наблюдалось увеличение акустической анизотропии [7]. Небольшое изменение ориентации кристаллов, имеющих существенную анизотропию упругих свойств, при формировании текстуры деформации, приводит к изменению коэффициентов ФРО и, соответственно, параметра ΔA, величина которого зависит от коэффициента W_4^{20} (выражение (9)).

Пластическое деформирование стали 08Х18Н10Т ведет к увеличению параметра $\Delta\overline{A}$ (рис.2б).

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что при больших амплитудах деформации формирование кристаллографической текстуры является превалирующим процессом, влияющим на величину $\Delta\overline{A}$. Величина $\Delta\overline{A}$ увеличивается аналогично ее изменению при статическом нагружении.

При малых амплитудах на величину $\Delta\overline{A}$ могут оказать влияние другие факторы, например аллотропические изменения, при которых выделяется фаза, имеющая своё кристаллическое строение и свою преимущественную ориентацию. Необходимо также учитывать, что микроповреждения (дислокационные диполи, микротрещины) могут быть

ориентированы определенным образом, что оказывает влияние на анизотропию упругих свойств.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов Пуассона от количества циклов нагружения.

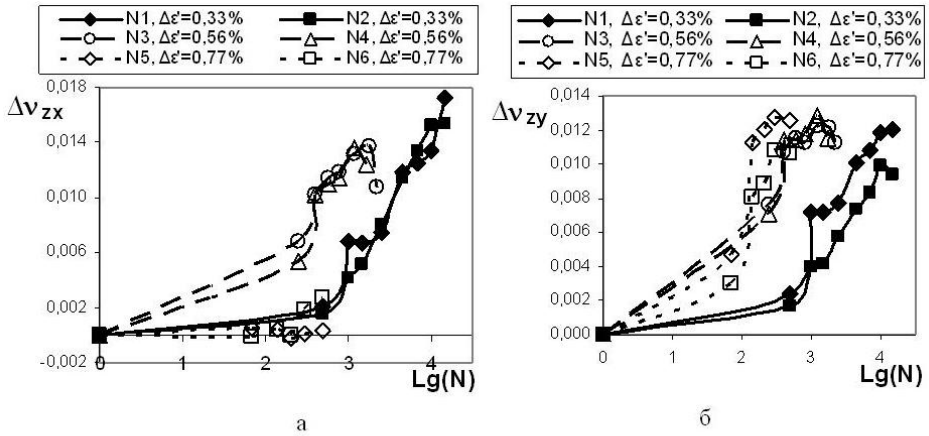


Рис. 3. Зависимости изменений коэффициентов Пуассона ν_{zx} и ν_{zy} от количества циклов нагружения: измерение вдоль оси нагружения (а), поперек оси нагружения (б).

Как видно из уравнений (4)–(6), коэффициенты ФРО W_4^{20}, W_4^{00} оказывают различное влияние на скорости поперечных и продольных упругих волн и, соответственно, на коэффициенты Пуассона ν_{zx} и ν_{zy}, которые определяются с помощью соотношения этих скоростей (выражение (1)). По-видимому, с этим связано различное поведение кривых $\nu_{zx}(N)$ и $\nu_{zy}(N)$.

Отметим, что величины ν_{zx} и ν_{zy} при различных амплитудах деформирования растут. Это можно объяснить тем, что при аллотропическом превращении выделяется фаза, модули упругости которой выше, чем у матрицы материала.

На рис. 4 представлена зависимость между изменениями коэффициентов Пуассона $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$, полученная с помощью акустических измерений. Кривые на рис. 4 разделяются при различных значениях амплитуды циклической деформации Δε'.

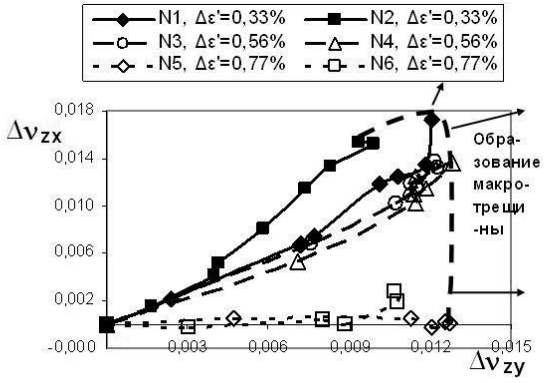


Рис. 4. Взаимосвязь между изменениями коэффициентов Пуассона ν_{zx} и ν_{zy}.

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 Δε'. Как показал эксперимент, для максимальной амплитуды он минимален.

Согласно проведенным расчетам, длина L кривой $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$ в момент появления макротрещины оставалась приблизительно постоянной при разных амплитудах циклического деформирования. По мере исчерпания ресурса материала длина L росла, достигая критического значения L^*. Кривую $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$ предлагается использовать для оценки степени деградации материала акустическим методом на ранних стадиях разрушения до появления макротрещины. Введем параметр П для оценки состояния материала:

$$\Pi = \frac{\overline{L}_0}{\overline{L}^* + f(\Delta\nu_{zx}/\Delta\nu_{zy}))} \qquad (10)$$

где $\overline{L}_0$ – средняя длина кривой $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$, $L = (\Delta\nu^2_{zx}+\Delta\nu^2_{zy})^{1/2}$, $\overline{L}^*$ – среднее значение длины кривой для критических величин $\Delta\nu^*_{zx}$ и $\Delta\nu^*_{zy}$, $\overline{L}^* = 0{,}016$, $f(\Delta\nu_{zx}/\Delta\nu_{zy}))$ – некоторая корректирующая длину кривой функция, которая зависит от угла наклона кривой, характеризуемого соотношением $(\Delta\nu_{zx}/\Delta\nu_{zy})$:

$$f\left(\Delta\nu_{zx}/\Delta\nu_{zy}\right) = k_0 + k_1\left(\Delta\nu_{zx}/\Delta\nu_{zy}\right) + k_2\left(\Delta\nu_{zx}/\Delta\nu_{zy}\right)^2, \qquad (11)$$

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

Зависимости параметра П от количества циклов нагружения для трех вышеуказанных пар образцов, испытанных на усталость, приведены на рис. 5. Резкий рост параметра П после 100-700 циклов, по-видимому, связан с окончанием стадии инкубационного периода [13], который наблюдается у большинства поликристаллических сплавов, подвергаемых усталостному разрушению.

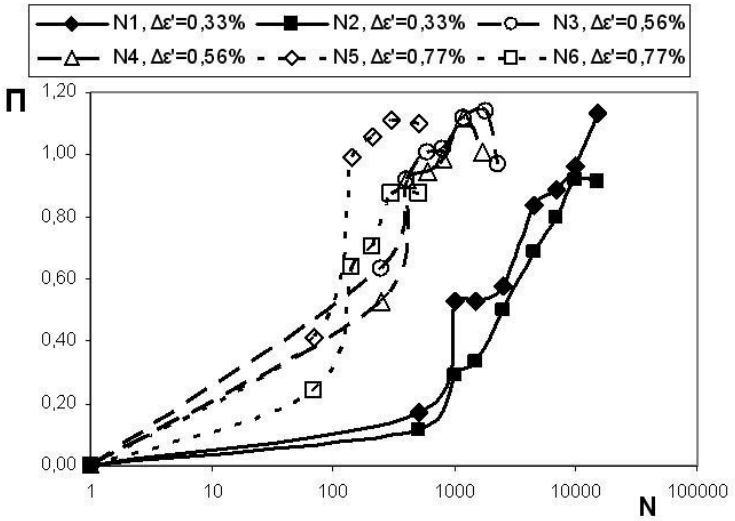


Рис. 5. Параметр П в зависимости от количества циклов нагружения.

Кроме усталостных испытаний при постоянных амплитудах деформации, были проведены исследования стали 08Х18Н10Т при блочном циклическом нагружении, когда нагружение материала происходит с разными амплитудами деформации, что, как правило, имеет место при эксплуатации элементов конструкций.

Эксперимент показал, что для блочного нагружения длина кривой в координатах L_{zx} и L_{zy}, где L_{zx} и L_{zy} – суммы абсолютных значений изменений коэффициентов Пуассона, определяемые как:

$L_{zx} = \sum_i \left|\Delta \nu_{zx}\right|_i$, $L_{zy} = \sum_i \left|\Delta \nu_{zy}\right|_i$, где $i = 1..N$, N – максимальное число экспериментальных точек на кривой, $L_{zx}(L_{zy})$ остается постоянной в момент появления макротрещины (рис. 6). Приращение длины кривой L и длина кривой в случае блочного нагружения определялись следующим образом:

$$\Delta L_i = \left[\left(\left|\Delta \nu_{zx}\right|_i\right)^2 + \left(\left|\Delta \nu_{zy}\right|_i\right)^2\right]^{1/2};\ L = \sum \Delta L_i$$

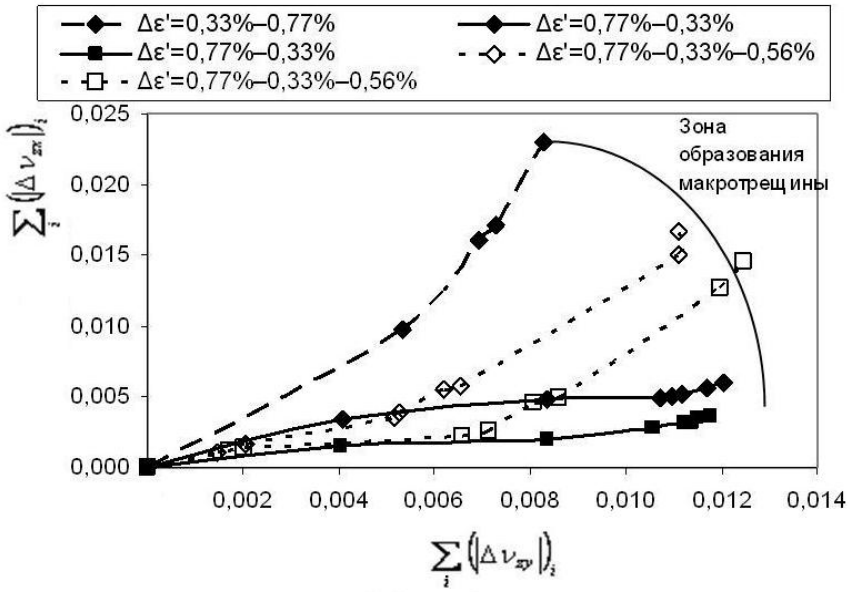


Рис. 6. Зависимости L_{zx} (L_{zy}) при блочном режиме нагружения.

Изменение параметра деградации $\Pi' = L/L*$ от количества циклов нагружения при блочном режиме приведено на рис.7.

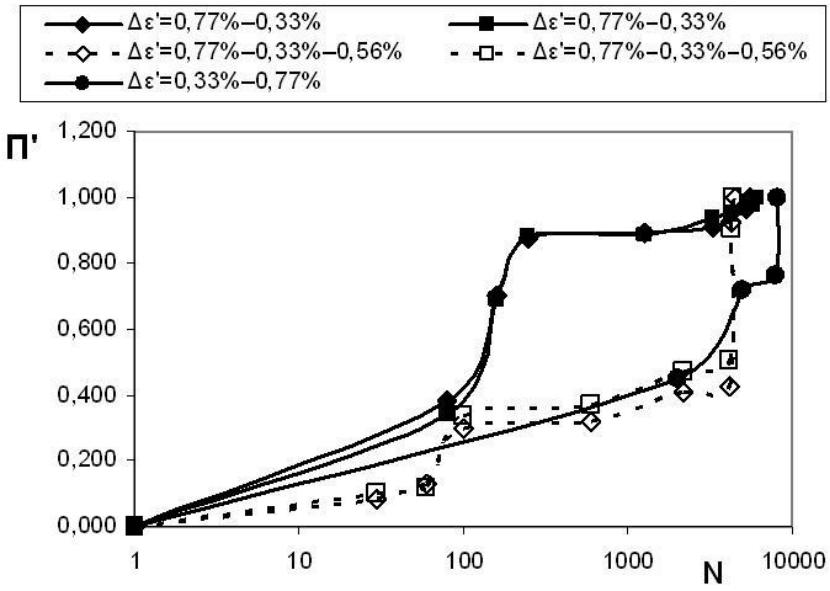


Рис. 7. Изменение параметра деградации $\Pi' = L/L*$ в зависимости от количества циклов нагружения при блочном режиме.

Момент достижения близкого к единице значения параметра П (или П') характеризуется появлением макротрещины. Аллотропические изменение (образование (мартенсита) при циклическом деформировании напрямую связано с разрушением материала на микроуровне [11]. Концентрация напряжений в местах соединения выделившихся жестких частиц с матрицей ведет к образованию микротрещин и дальнейшему разрушению сплава. Изменение модулей, в том числе коэффициента Пуассона, связано с увеличением концентрации и размера этих частиц и позволяет по изменению $\Delta\nu_{zx}$ и $\Delta\nu_{zy}$ косвенно судить о степени деградации материала.

Выводы

В результате проведенных исследований разработан алгоритм оценки степени деградации стали 08Х18Н10Т на ранней стадии усталостного разрушения, основанный на измерении с помощью акустического эхо-метода коэффициентов Пуассона ν_{zx} и ν_{zy} и вычислении длины кривой $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$ относительно её критического значения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты №09-08-00892-а, №09-08-00827-а, №11-08-97070-р_поволжье_а).

Литература

1. Митенков Ф.М., Мишакин В.В., Пичков С.Н., Клюшников В.А., Данилова Н.В. Использование оптического и акустического методов контроля для оценки поврежденности сталей на ранних стадиях усталостного разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2009. – №12 – С. 60–65.

2. Мишакин В.В., Клюшников В.А., Кассина Н.В. Исследование процесса разрушения сталей акустическим методом и методом делительных сеток // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2009. – №5. – С. 33-39.

3. Sayers C.M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // Appl. Phys., 1982. Vol. 15. P. 2157–2167.

4. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. – 308 с.

5. Laszlo Adler, Rose James H., Mobley Carroll J. Ultrasonic method to determine gas porosity in aluminum alloy castings: Theory and experiment // Appl. Phys., 1985. Vol. 59, No. 2, P. 335–347.

6. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев [и др.]; Под ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с. – ISBN 5-217-02711-8.

7. Мишакин В.В., Наумов М.Ю., Мишакин С.В., Кассина Н.В. Разработка акустического метода оценки поврежденности металлических сплавов до образования макротрещины // Дефектоскопия, 2007. – №10. – С. 49–57.

8. Вавакин А.С., Салганик Р.Л. Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями // Механика твердого тела, 1975. – № 3. – С. 65–76.

9. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин // Механика твердого тела. 1973. – № 4. – С. 149-158.

10. Allen, D., and Sayers, C. The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique // Ultrasonics, 1984. Vol. 22. P. 179-188.

11. Соснин О.В., Громова А.В, Козлов Э.В., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В. Закономерности эволюции дислокационных субструктур в сталях при усталости // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, СамГТУ, Самара, 2004. – С. 185-192.

12. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.; Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

13. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев; Отв. ред. Н.П. Лякишев. – М.: Наука, 2003. – 254 с.

Поступила: 04.10.11.