

# Исследование структуры и свойств Structure and properties research

## Физические методы исследования и контроля

## Physical methods of research and monitoring

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-30-34

УДК (UDC) 534.8:539.26–431.2

### ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕКСТУРЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 15ЮТА АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПРИ УСТАЛОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ\*

© Василий Васильевич Мишакин<sup>1, 2</sup>, Владимир Нинелович Серебряный<sup>3</sup>, Александр Викторович Гончар<sup>1</sup>,  
Вячеслав Александрович Клюшников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиностроения РАН — филиал Федерального исследовательского центра Института прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: imndt31@mts-nn.ru

<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия;  
e-mail: imndt31@mts-nn.ru

<sup>3</sup> Институт metallurgии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН, Москва, Россия; e-mail: vns@imet.ac.ru.

Статья поступила 10 ноября 2017 г.

Представлены результаты исследования изменения текстуры и коэффициентов Пуасона конструкционной стали 15ЮТА при усталостном разрушении в области многоцикловой усталости ультразвуковым эхо-импульсным методом. Используя объемные упругие волны и прецизионное измерение времени их распространения, получили значения коэффициентов функции распределения ориентировок ( $W_4^{00}$  и  $W_4^{20}$ ), на основе которых строили полюсные фигуры. В качестве параметра, характеризующего остроту текстуры, использовали отношение интенсивностей в центре полюсной фигуры и в точке, отстоящей от центра на  $45^\circ$  вдоль направления прокатки. Установили, что изменение остроты текстуры связано с процессами развития микропластических деформаций и накопления микроповреждений. Изменение остроты текстуры в зависимости от количества циклов нагружения носит немонотонный характер. На начальном (первом) этапе нагружения наблюдали рост остроты, что можно объяснить развитием микродеформаций по наиболее благоприятно ориентированным плоскостям скольжения. На втором — уменьшение, что связано с рассеянием текстуры при повышении плотности микродефектов в процессе разрушения сплава. Параметр, характеризующий остроту текстуры, можно использовать как индикатор предразрушения при мониторинге материала конструкции ультразвуковым методом.

**Ключевые слова:** усталостное разрушение; текстура; ультразвук; коэффициенты ФРО; полюсная фигура; сталь 15ЮТА.

### ACOUSTIC STUDY OF THE TEXTURE CHARACTERISTICS OF 15YuTA CONSTRUCTION STEEL IN FATIGUE FAILURE CONDITIONS

© Vasily V. Mishakin<sup>1, 2</sup>, Vladimir N. Serebryany<sup>3</sup>,  
Aleksandr V. Gonchar<sup>1</sup>, Vyacheslav A. Klyushnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Research Institute, RAS, — branch of Federal Research Center The Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia; e-mail: imndt31@mts-nn.ru

<sup>2</sup> R. E. Alekseev State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia; e-mail: imndt31@mts-nn.ru

<sup>3</sup> A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia; e-mail: vns@imet.ac.ru

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект RFMEFI58017X0012).

*Submitted November 10, 2017.*

Ultrasonic echo-pulse method is used to study the texture changes and Poisson's coefficients of 15YuTA construction steel upon fatigue failure in the range of high-cycle fatigue. To describe the texture change, pole figures were constructed using the values of the orientation distribution functions ( $W_{400}$  and  $W_{420}$ ) obtained from the results of precise measurements of the propagation time of elastic bulk waves in sheet materials. The intensity ratio in the center of the pole figure and the point remote from the center of the pole figure by  $45^\circ$  along the rolling direction was used as a parameter characterizing the texture sharpness. It is shown that change in the texture sharpness is attributed to the development of microplastic strain and accumulation of the microdamages. A nonmonotonic dependence of the change in the texture sharpness on the number of loading cycles is observed. At the initial stage of loading, there is some increase in the sharpness of the texture, which can be attributed to the development of micro-strains on the most favorably oriented sliding planes. At the second stage, a decrease in the texture sharpness is associated with the scattering of the texture as the density of microdefects increases during the destruction of the alloy. The parameter characterizing the texture sharpness can be used as a pre-destruction indicator when monitoring the material of the structure by the ultrasonic method.

**Keywords:** fatigue failure; texture; ultrasonic; coefficients of the orientation distribution function; pole figure; steel 15YuTA.

Усталостное разрушение поликристаллических материалов сопровождается изменением дислокационной структуры, кристаллографической текстуры, образованием микронесплошностей — микропор, микротрещин и др. Все эти процессы отражаются на упругих свойствах материала, характеристиках микронеоднородности и, соответственно, на акустических параметрах — скорости и затухании упругих волн (УВ), коэффициенте Пуассона, акустической анизотропии [1 – 3].

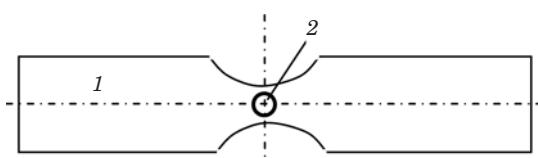
Важную роль в процессе усталостного разрушения и пластического деформирования играют микропластические деформации, обусловленные неоднородностью напряжений второго рода, которые в свою очередь локализуются, например, по границам зерен, жестких включений, пересечений дислокаций. Микропластические деформации связаны с микронапряжениями и адаптационными процессами, заключающимися в релаксации напряжений в основном за счет ротационных мод микропластических деформаций [4] и образования микронесплошностей (на более поздних стадиях).

Ротационные моды микропластической деформации на уровне зерна (поворот зерна как целиком) и внутризеренном уровне (фрагментация зерна на более поздних стадиях разрушения) могут менять кристаллографическую текстуру. Прецизионное измерение акустических характеристик, например, времени и скорости распространения объемных продольных и поперечных УВ, позволяет регистрировать малые изменения упругих свойств поликристаллических материалов, рассчитать некоторые коэффициенты ( $W_4^{00}$ ,  $W_4^{20}$  и  $W_4^{40}$ ) функции распределения ориентировок (ФРО) и построить полюсные фигуры [5 – 8], проследить их изменения в процессе деформирования.

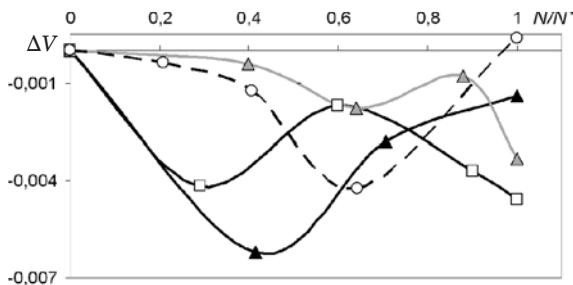
Акустический метод имеет ряд преимуществ по сравнению с рентгеновским, с помощью которого обычно определяют коэффициенты ФРО. (Рентгеновским методом оценивают текстуру в узком поверхностном слое металла, имеющем, как правило, отличные от объема структурные характеристики.) Он мобилен, акустические преобразователи можно устанавливать на мало- и крупногабаритные объекты и проводить измерения при одностороннем доступе к плоским элементам конструкции. Используя ультразвуковые объемные волны, можно получать данные по всей прозвучиваемой толщине материала, включая поверхностный слой.

Цель работы — исследование влияния усталостного разрушения на характеристики текстуры низкоуглеродистой стали 15ЮТА, рассчитанные по результатам акустических измерений.

Исследовали влияние циклического деформирования на акустические свойства образцов прямоугольного сечения размером  $120 \times 20 \times 3$  мм, вырезанных вдоль направления проката из листовой горячекатаной стали 15ЮТА [10]. Механические характеристики стали, МПа:  $\sigma_t = 290$ ,  $\sigma_b = 430$ . Химический состав, %: 0,09 – 0,15 — С, 0,5 – 0,8 — Si, 0,8 – 1,2 — Mn, не более 0,3 — Cr, Ni, Cu, не более 1,5 — Al и Ti. Усталостные испытания проводили по схеме консольного изгиба на машине резонансного типа (частота



**Рис. 1.** Схема установки пьезоэлектрического преобразователя (2) на образце (1)



**Рис. 2.** Зависимость изменения коэффициента Пуассона от наработки при циклическом деформировании стали 15ЮТА с амплитудой нагрузления 336 ( $\blacktriangle$ ), 306 ( $\square$ ), 275 ( $\circ$ ) и 250 МПа ( $\triangle$ )

нагружения — 9 Гц), акустические измерения — после каждого 10–30 тыс. циклов нагружения вплоть до появления макротрешины длиной 1 мм. Схема установки датчика на образце представлена на рис. 1.

Акустические характеристики измеряли эхопульсным методом, для чего использовали пьезоэлектрические датчики продольных и поперечных объемных УВ фирмы Olympus (диаметр — 8 мм, центральная частота — 4,6 МГц, длительность зондирующего сигнала — около 2 мкс). Относительная погрешность измерения времени распространения составляла не более 0,1 %.

В приближении Хилла уравнения связи скоростей распространения УВ с коэффициентами ФРО имеют следующий вид [5]:

$$\rho V_{zz}^2 = K + \frac{4\mu}{3} + \frac{32\sqrt{2}\pi^2}{35} c W_4^{00}, \quad (1)$$

$$\rho V_{zx}^2 = \mu \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c \left[ W_4^{00} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_4^{20} \right], \quad (2)$$

$$\rho V_{zy}^2 = \mu \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c \left[ W_4^{00} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_4^{20} \right], \quad (3)$$

где  $c = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}$  ( $c_{11}$ ,  $c_{12}$ ,  $c_{44}$  — модули упругости монокристалла);  $W_4^{00}$  и  $W_4^{20}$  — коэффициенты ФРО;  $K$  и  $\mu$  — модули всестороннего сжатия и сдвига;  $\rho$  — плотность материала;  $V_{zx}$  и  $V_{zy}$  — скорости распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль и поперек направления оси проката;  $V_{zz}$  — скорость распространения продольных УВ.

Измеряя время распространения продольных и поперечных УВ, из (1) – (3) определяли коэффициенты ФРО следующим образом:

$$W_4^{00} = \frac{35}{16\sqrt{2}\pi^2} \frac{1}{c} \left[ \mu - \frac{A_1}{2} \left( K + \frac{10\mu}{3} \right) \right], \quad (4)$$

$$W_4^{20} = \frac{7}{32\pi^2} \frac{\sqrt{5}}{c} \left( K + \frac{10\mu}{3} \right) A_2, \quad (5)$$

где

$$A_1 = \frac{V_{zy}^2 + V_{zx}^2}{\sum V_{zi}^2} = \frac{\tau_{zy}^{-2} + \tau_{zx}^{-2}}{\sum \tau_{zi}^{-2}},$$

$$A_2 = \frac{V_{zy}^2 - V_{zx}^2}{\sum V_{zi}^2} = \frac{\tau_{zy}^{-2} - \tau_{zx}^{-2}}{\sum \tau_{zi}^{-2}} —$$

характеристики кристаллографической текстуры материала;  $\tau_{zx}$  и  $\tau_{zy}$  — время распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль и поперек направления оси проката;  $\tau_{zz}$  — время распространения продольных УВ. Для изотропного материала коэффициенты ФРО  $W_l^{mn} = 0$  (кроме  $W_1^{00} = 1$ ).

Интенсивность отражений от плоскостей  $U$  рассчитывали по формуле [6–8]

$$U = 4\pi q(\xi, \eta) = 1 + 4\pi S \left( \frac{3\sqrt{2}}{8} (35\xi^4 - 30\xi^2 + 3) W_4^{00} + \frac{9\sqrt{5}}{2} (1 - \xi^2) \left[ 1 - \frac{7}{6} (1 - \xi^2) \right] W_4^{20} \cos 2\eta + \frac{3\sqrt{35}}{8} (1 - \xi^2)^2 W_4^{40} \cos 4\eta \right), \quad (6)$$

где  $S$  — коэффициент;  $\xi = \cos \chi$  ( $\chi$ ,  $\eta$  — полярный и азимутальный углы соответственно).

По данным ультразвуковых измерений рассчитывали коэффициенты Пуассона  $v_{zx}$  и  $v_{zy}$ , соотношение которых отражает анизотропию упругих свойств, по формулам

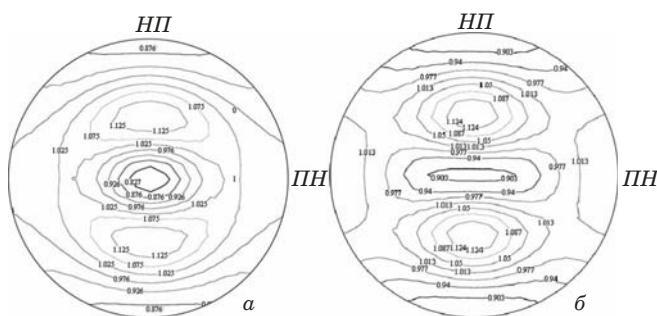
$$v_{zx} = \frac{V_{zz}^2 - 2V_{zx}^2}{2(V_{zz}^2 - V_{zx}^2)} = \frac{\tau_{zx}^2 - 2\tau_{zz}^2}{2(\tau_{zx}^2 - \tau_{zz}^2)},$$

$$v_{zy} = \frac{V_{zz}^2 - 2V_{zy}^2}{2(V_{zz}^2 - V_{zy}^2)} = \frac{\tau_{zy}^2 - 2\tau_{zz}^2}{2(\tau_{zy}^2 - \tau_{zz}^2)}. \quad (7)$$

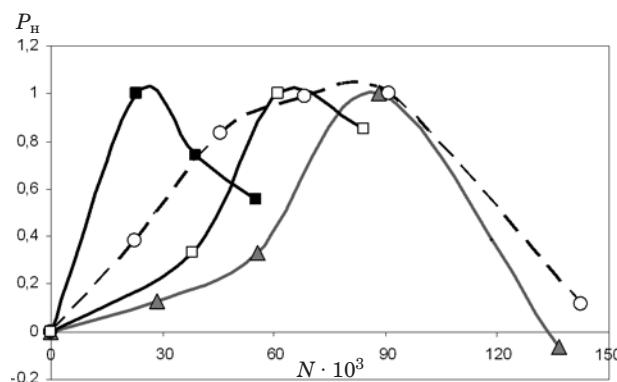
На рис. 2 приведена зависимость изменения коэффициента Пуассона  $v$  от наработки  $N/N^*$  ( $N$ ,  $N^*$  — циклы нагружения и при разрушении) при различной амплитуде нагрузления. Видно, что коэффициент Пуассона меняется немонотонно, наблюдается стадийность разрушения [3].

Рассчитанные  $W_4^{00}$ ,  $W_4^{20}$  далее использовали при создании полюсных фигур (рис. 3).

Параметр остроты текстуры  $P$  определяли из отношения:  $P = U_{\min}/U_{\max}$  ( $U_{\min}$ ,  $U_{\max}$  — интенсивности в центре полюсной фигуры и в точке, отстоящей от центра на  $45^\circ$  вдоль направления прокатки).



**Рис. 3.** Полюсные фигуры (001) для стали 15ЮТА в исходном состоянии ( $W_4^{00} = -0,0013$ ,  $W_4^{20} = -0,0005$ ) (а) и после 90 тыс. циклов нагружения ( $W_4^{00} = -0,00067$ ,  $W_4^{20} = -0,00069$ ) (б)

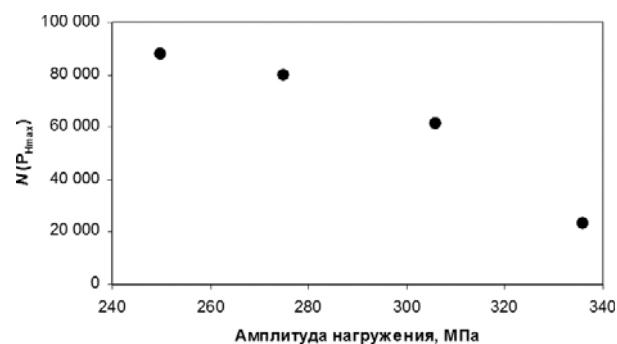


**Рис. 4.** Зависимость нормированного значения остроты текстуры  $P_h$  от количества циклов  $N$  при амплитуде нагрузления 336 (■), 306 (□), 275 (○) и 250 МПа (▲)

Зависимость нормированного значения остроты текстуры ( $P_h = P/P_{\max}$ , где  $P_{\max}$  — максимальное значение остроты) от количества циклов  $N$  для различных амплитуд нагружения представлена на рис. 4. Видно, что на начальном этапе нагружения  $P_h$  растет. Это можно объяснить интенсивным развитием микродеформаций по наиболее благоприятно ориентированным плоскостям скольжения. Затем после достижения максимума рассеяние текстуры приводит к уменьшению параметра  $P_h$ , что связано с повышением плотности дефектов вблизи барьеров (границ зерен или скопления самих дефектов) в процессе циклического деформирования (значение  $P_h$  начинает уменьшаться при исчерпании ресурса как минимум на 50 %).

На рис. 5 приведена зависимость количества циклов, при котором достигается максимум нормированной остроты текстуры  $N(P_{h\max})$  от амплитуды нагружения. Видно, что с ростом амплитуды нагружения  $N(P_{h\max})$  уменьшается. Это позволяет использовать параметр  $P_h$  как индикатор предразрушения при мониторинге материала конструкции.

Таким образом, проведенные исследования показали, что акустические параметры чувствительны к структурным процессам, протекающим в материале при усталостном нагружении. Изменение остроты текстуры отражает процессы развития микропластических деформаций и накопления микроповреждений. Вместе с тем мониторинг акустических характеристик может выявить начало необратимых изменений в металле на ранней стадии разрушения (до образования макротрешины), а также оценить исчерпание ресурса материала.



**Рис. 5.** Зависимость количества циклов, при котором достигается максимум параметра  $P_h$ , от амплитуды нагрузления

2. Гончар А. В., Мишакин В. В., Ключников В. А., Курашкин К. В. Изменение упругих характеристик метастабильной аустенитной стали при циклическом деформировании / Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 4. С. 518 – 521.
3. Гончар А. В., Руденко А. Л., Мишакин В. В. Использование акустического и оптического методов неразрушающего контроля для исследования усталостного разрушения сталей до образования макротрешины / Деформация и разрушение материалов. 2012. № 7. С. 37 – 42.
4. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1985. — 230 с.
5. Allen D., Sayers C. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique / Ultrasonics. 1984. Vol. 22. P. 179 – 188.
6. Hirao M., Aoki K., Fukuoka K. Texture of polycrystalline metals characterized by ultrasonic velocity measurements / J. Acoust. Soc. Am. 1987. N 81(5). P. 1434 – 1440.
7. Sayers C. M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates / Appl. Phys. 1982. Vol. 15. P. 2157 – 2167.
8. Серебряный В. Н. Количественная оценка текстуры стальных листов с помощью ультразвуковых объемных волн / Заводская лаборатория. 1994. Т. 60. № 4. С. 29 – 34.
9. Bunge H. J. Three-dimensional texture analysis / International Materials Review. 1987. Vol. 32. P. 265 – 291.
10. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 25 с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мишакин В. В., Ключников В. А., Гончар А. В. Связь энергии деформации с коэффициентом Пуассона при циклическом нагружении аустенитной стали / Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 5. С. 32 – 36.

## REFERENCES

1. **Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Gonchar A. V.** The relationship between deformation energy and Poisson's ratio under cyclic loading of austenitic steel / Zh. Tekhn. Fiz. 2015. Vol. 85. N 5. P. 32 – 36 [in Russian].
2. **Gonchar A. V., Mishakin V. V., Klyushnikov V. A., Kurashkin K. V.** The change in the elastic characteristics of metastable austenitic steel during cyclic deformation / Zh. Tekhn. Fiz. 2017. Vol. 87. N 4. P. 518 – 521 [in Russian].
3. **Gonchar A. V., Rudenko A. L., Mishakin V. V.** The use of acoustic and optical methods of nondestructive testing to study the fatigue failure of steels before the formation of a macrocrack / Deform. Razrush. Mater. 2012. N 7. P. 37 – 42 [in Russian].
4. **Panin V. E., Likhachev V. A., Grinyaev Yu. V.** Structural levels of deformation of solids. — Novosibirsk: Nauka, 1985. — 230 p. [in Russian].
5. **Allen D., Sayers C.** The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique / Ultrasonics. 1984. Vol. 22. P. 179 – 188.
6. **Hirao M., Aoki K., Fukuoka K.** Texture of polycrystalline metals characterized by ultrasonic velocity measurements / J. Acoust. Soc. Am. 1987. N 81(5). P. 1434 – 1440.
7. **Sayers C. M.** Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates / Appl. Phys. 1982. Vol. 15. P. 2157 – 2167.
8. **Serebryanyi V. N.** Quantification of the texture of steel sheets by means of ultrasonic volume waves / Zavod. Lab. 1994. Vol. 60. N 4. P. 29 – 34 [in Russian].
9. **Bunge H. J.** Three-dimensional texture analysis / International Materials Review. 1987. Vol. 32. P. 265 – 291.
10. State Standard GOST 25.502–79. Strength analysis and testing in machine building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing. — Moscow: Izd. standartov, 1985. — 25 p. [in Russian].