

УДК 620.179.162

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-255-264

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКУЮ
ТЕКСТУРУ И УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ***

© 2021 г.

**Мишакин В.В., Гончар А.В.,
Ключников В.А., Курашкин К.В.**

*Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального
исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН»,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

imndt31@mts-nn.ru

Поступила в редакцию 19.05.2021

Приведены результаты исследования влияния пластического деформирования на изменение коэффициентов функции распределения ориентировок W_{400} и W_{420} низколегированной стали 09Г2С. Для расчета этих коэффициентов использовались скорости и времена распространения поперечных и продольных объемных упругих волн и их соотношения. Приведена физическая интерпретация коэффициентов W_{400} и W_{420} . Коэффициент W_{420} отражает эффект двулучепреломления поперечных объемных упругих волн, коэффициент W_{400} линейно связан с коэффициентом Пуассона. Оба параметра являются структурно чувствительными характеристиками и используются для оценки состояния материалов методами неразрушающего контроля. В результате исследования получено, что характерные участки на диаграмме растяжения стали с эффектом деформационного старения (площадка текучести, участок, соответствующий параболическому упрочнению, начало образования шейки) имеют соответствующие отображения на динамике изменения коэффициентов функции распределения ориентировок. Площадка текучести характеризуется активным изменением характеристик текстуры. Упрочнение материала приводит к замедлению интенсивности изменения исследуемых коэффициентов. Приведены выражения, связывающие изменения коэффициента Пуассона с величиной упрочнения исследуемой стали, а также параметра акустической анизотропии, отражающего эффект двулучепреломления, с величиной пластической деформации. Расчетные значения величины упрочнения по данным акустических измерений хорошо согласуются с величиной упрочнения, полученной при анализе диаграммы растяжения. Погрешность определения величины пластической деформации акустическим методом составила не более 0,3%. Показано, что мониторинг упругих характеристик акустическим методом дает возможность эффективно оценивать состояние пластически деформированной стали неразрушающим методом контроля.

*Выполнено в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021–2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

Ключевые слова: пластическая деформация, деформационное упрочнение, кристаллографическая текстура, коэффициенты функции распределения ориентировок, ультразвуковой метод.

Введение

В процессе разрушения поликристаллического материала при пластическом деформировании происходят сложные структурные изменения, отражающиеся на упругих и акустических характеристиках металла [1–5]. Основное влияние на изменение модулей упругости, анизотропии упругих свойств поликристаллических материалов оказывает изменение кристаллографической текстуры [6–8] и процессы деградации, связанные с образованием микроповреждений, например микропор, микротрещин [9].

Согласно [10], расчет изменения кристаллографической текстуры при пластическом деформировании поликристаллического металла заключается в определении сдвиговых напряжений в плоскостях скольжения кристаллов, расчете микродеформаций в этих плоскостях, пересчете изменения ориентации (углов поворота) кристаллографических осей кристаллитов в результате этих деформаций с учетом стеснения деформаций зерен и расчете преимущественной ориентации кристаллических решеток в поликристалле. Расчеты проводятся для плоскостей и направлений (систем скольжения), характерных для данного металла. В простейшем случае углы поворота решетки кристаллитов линейно связаны со сдвиговыми деформациями в плоскостях скольжения. Деформации в плоскостях скольжения обеспечиваются, как правило, дислокациями, причем их движение может быть затруднено различного рода барьерами, в качестве которых могут быть границы зерен, примесные атомы и дефекты различной природы, например мезодефекты. В [11] проведен расчет влияния мезодефектов на величину коэффициента функции распределения ориентировок (ФРО) W_{420} и его изменение при деформировании поликристаллического материала.

Современное описание изменения текстуры при достаточно больших деформациях учитывает поворот решетки в локальных частях кристалла, связанный, например, с торможением дислокаций на различно ориентированных границах [12, 13]. При фрагментации зерен ориентировки кристаллической решетки ячеек и блоков ячеек также влияют на кристаллографическую текстуру. В целом, на макроуровне, интегральные характеристики, отражающие изменения преимущественной ориентации кристаллических решеток, определяются сложными структурными изменениями.

Акустический метод позволяет проводить построение полюсных фигур [7, 8, 14, 15], оценить характеристики текстуры металлических сплавов [16–19]. В отличие от метода рентгеноструктурного анализа, этот метод оперативен, легко может применяться для измерений непосредственно на элементах конструкций. Согласно [7, 8], некоторые коэффициенты ФРО количественно определяются с помощью соотношения скоростей и времен распространения объемных упругих волн. Мониторинг изменения этих параметров отражает стадийность разрушения материала и позволяет оценить степень деградации сталей в процессе пластического деформирования.

Целью настоящей статьи является исследование влияния пластического деформирования на характеристики текстуры низколегированной стали 09Г2С, определяемые акустическим методом.

Связь акустических параметров с характеристиками текстуры

Для катаных листовых материалов, обладающих орторомбической симметрией, связь коэффициентов ФРО W_{400} и W_{420} с упругими константами и скоростями распространения объемных упругих волн выражается в виде зависимостей [6]:

$$v_{zx}^2 = \frac{\mu}{\rho} + c \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right) \frac{1}{\rho}, \quad (1)$$

$$v_{zy}^2 = \frac{\mu}{\rho} + c \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_{420} \right) \frac{1}{\rho},$$

$$v_{zz}^2 = \left(K + \frac{4\mu}{3} \right) \frac{1}{\rho} + \frac{32}{35} \sqrt{2} \pi^2 W_{400} \frac{c}{\rho}, \quad (2)$$

где K – модуль всестороннего сжатия, μ – модуль сдвига, ρ – плотность, c – фактор анизотропии монокристалла, v_{zx} , v_{zy} – скорости поперечных волн, v_{zz} – скорость продольных волн, первый индекс – направление распространения, второй индекс – направление поляризации. Ось z расположена вдоль нормали к направлению прокатки, оси x и y расположены соответственно вдоль и поперек направления прокатки. Используя выражения (1) и (2), выразим коэффициенты ФРО:

$$W_{420} = \frac{7\sqrt{5}}{32\pi^2 c} \left(K + \frac{10\mu}{3} \right) A_1, \quad A_1 = \frac{v_{zx}^2 - v_{zy}^2}{v_{zx}^2 + v_{zy}^2 + v_{zz}^2} = \frac{t_{zx}^{-2} - t_{zy}^{-2}}{t_{zx}^{-2} + t_{zy}^{-2} + t_{zz}^{-2}}, \quad (3)$$

$$W_{400} = \frac{35}{32\sqrt{2}\pi^2 c} \left(2\mu - \left(K + \frac{10\mu}{3} \right) A_2 \right), \quad A_2 = \frac{v_{zx}^2 + v_{zy}^2}{v_{zx}^2 + v_{zy}^2 + v_{zz}^2} = \frac{t_{zx}^{-2} + t_{zy}^{-2}}{t_{zx}^{-2} + t_{zy}^{-2} + t_{zz}^{-2}}, \quad (4)$$

где t_{zz} , t_{zx} и t_{zy} – времена распространения продольной и поперечных упругих волн соответственно.

Коэффициент ФРО W_{420} отражает эффект двулучепреломления поперечных объемных упругих волн.

Проведение эксперимента

Для исследований были изготовлены плоскопараллельные образцы прямоугольного сечения рабочей длиной 100 мм, шириной 15 мм и толщиной 3 мм из горячекатаной листовой стали 09Г2С. Проводилось поэтапное одноосное растяжение со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} при температуре 20 °С. Растяжение проводилось на универсальной сервогидравлической испытательной машине BiSS Nano.

Акустические измерения выполнялись на образцах в ненагруженном состоянии. Первое измерение было при деформации $\varepsilon = 0$. После растяжения до $\varepsilon \approx 4\%$ (первый этап деформации) образец вынимался из испытательной машины и проводились акустические измерения, затем образец помещался в испытательную машину и деформировался до новой величины (второй этап) и т.д. Погрешность измерения времени распространения продольных и поперечных упругих волн составляла менее 2 нс, скоростей – менее 3 м/с, коэффициента Пуассона ν и параметров A_1 , A_2 – менее $4 \cdot 10^{-4}$. Коэффициенты ФРО W_{420} и W_{400} рассчитывались по формулам (3) и (4) с учетом численных значений упругих констант: $c = -137,4 \text{ ГПа}$, $K = 167,8 \text{ ГПа}$, $\mu = 82,05 \text{ ГПа}$ [20].

Результаты и обсуждение

Кривая растяжения исследуемых сталей имеет вид, характерный для сталей с эффектом деформационного старения (рис. 1а). На рис. 1б приведена зависимость величины упрочнения $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ от деформации ε . Эффект деформационного старения проявляется на кривых растяжения в виде зуба и площадки текучести. Появление зуба текучести связано с миграцией примесных атомов к дислокациям, что приводит к блокированию их скольжения в решетке и упрочнению кристалла.

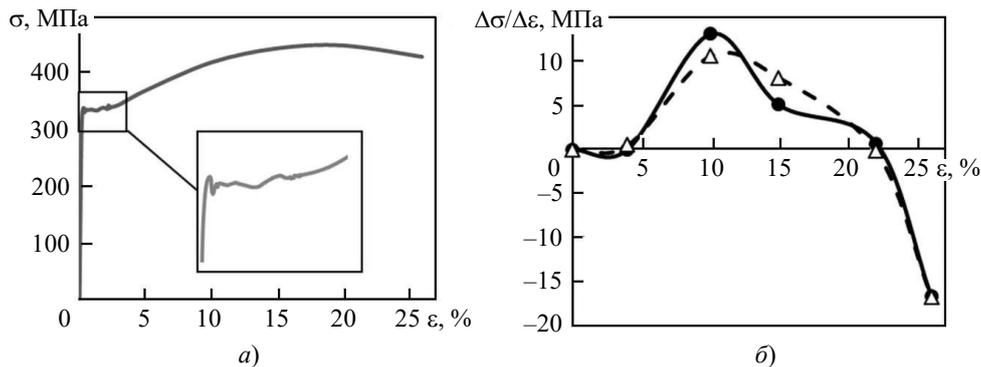


Рис. 1. Кривая напряжение–деформация (а) и зависимость величины упрочнения от деформации (б)

Согласно теории, предложенной Коттреллом и Билби [21] и развитой другими исследователями [22, 23], явление текучести описанного выше типа является результатом миграции внедренных атомов примесей к дислокациям.

Чтобы началась пластическая деформация, дислокации нужно оторвать от окружающих их «атмосфер» примесей или от выделений; для этого требуется напряжение, большее, чем напряжение, которое может перемещать дислокации в решетке твердого раствора. После преодоления зуба текучести материал деформируется на площадке текучести, которая заканчивается началом участка параболического упрочнения, практически без упрочнения.

В плоскостях скольжения при преодолении зуба текучести дислокации движутся относительно свободно, что способствует на этом этапе более интенсивному изменению углов ориентации решетки и, соответственно, изменению кристаллографической текстуры. Окончание площадки текучести характеризуется увеличением упрочнения, обусловленного различными механизмами (сопротивлением скользящей дислокации другим дислокациям из-за повышения их плотности, концентрацией дислокаций у границ зерен, их торможением у дисперсионных частиц и др.). Зависимости усредненных значений коэффициентов ФРО W_{400} и W_{420} по исследуемым зонам образца от величины пластической деформации приведены на рис. 2.

На площадке текучести наблюдается наиболее интенсивное изменение коэффициента ФРО W_{400} (рис. 2а). Изменение W_{400} в этом случае определяется величиной пластической деформации по формуле $\Delta W_{400} = k_{01}\varepsilon$ ($k_{01} = 1,12 \cdot 10^{-4}$). С началом параболического упрочнения интенсивность изменения коэффициентов ФРО существенно уменьшается. При приближении к образованию шейки значение $W_{400}(\varepsilon)$ увеличивается, что можно объяснить активным процессом фрагментации, при котором ротационные моды микропластических деформаций изменяют ориентацию микрообъемов внутри кристаллитов, что сопровождается заметным изменением W_{400} .

Зависимость $W_{420}(\varepsilon)$ не имеет выраженной стадийности изменения (рис. 2б) по сравнению с кривой $W_{400}(\varepsilon)$. Это связано с тем, что на результаты расчета коэффициента W_{420} практически не оказывает влияния изменение модулей упругости и плотности за счет образования микродефектов (микропор, микротрещин), так как величина μ/ρ сокращается при определении разницы квадратов скоростей поперечных волн, входящих в уравнения (1), (2). На изменение этого коэффициента влияет интенсивность изменения сдвиговых мод микропластических деформаций при торможении дислокаций на барьерах, например на мезодефектах [11]. На величину W_{420} в основном оказывает влияние изменение анизотропии упругих свойств. На величину W_{400} , рассчитанного с помощью выражения (4), влияет изменение анизотропии упругих свойств, связанное с изменением текстуры. На стадии развитой пластической деформации на расчетное значение W_{400} может влиять снижение модулей упругости K и μ за счет образования дефектов. Поправки на изменение этих модулей могут дать более точное значение коэффициентов ФРО [24].

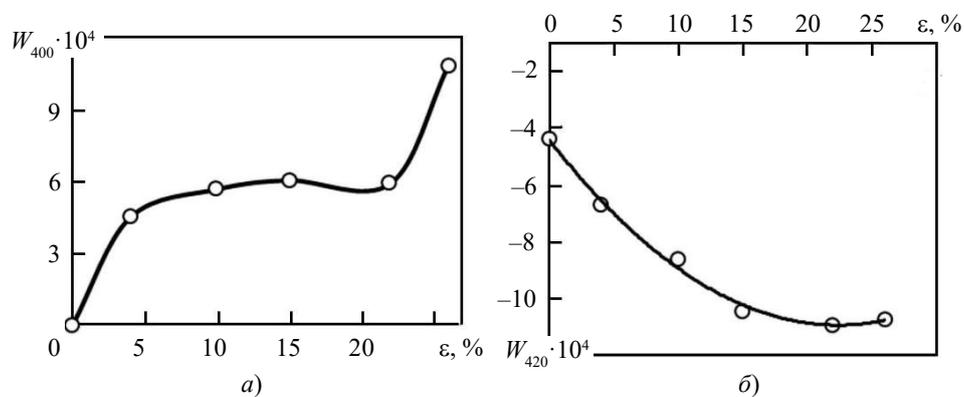


Рис. 2. Зависимость коэффициентов ФРО W_{400} (а) и W_{420} (б) от величины пластической деформации ε

Интенсивность изменения W_{400} связана с величиной пластической деформации ε и величиной упрочнения $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$. Зависимость $\Delta W_{400}(\varepsilon, \Delta\sigma/\Delta\varepsilon)$ можно разложить в ряд, ограничиваясь слагаемыми:

$$\Delta W_{400} = k_0 + k_1\varepsilon + k_2 \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} + k_3\varepsilon \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (5)$$

где $k_0 = 4,21 \cdot 10^{-4}$, $k_1 = 9,74 \cdot 10^{-6}$, $k_2 = 2,25 \cdot 10^{-5}$ МПа⁻¹, $k_3 = 4,21 \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹. Регрессионный анализ показал, что остальные члены разложения второго порядка не оказывают существенного влияния на исследуемую зависимость.

Для оценки состояния материалов, подвергаемых пластическому деформированию и усталостному разрушению, используются упругие характеристики – коэффициент Пуассона [25] и параметр акустической анизотропии [26]. Исходя из того, что коэффициент Пуассона ν определяется из соотношения скоростей упругих волн в виде [27]:

$$\nu = \frac{0,5 - (\nu_\tau/\nu_l)^2}{1 - (\nu_\tau/\nu_l)^2} = \frac{0,5 - (t_l/t_\tau)^2}{1 - (t_l/t_\tau)^2}, \quad (6)$$

и учитывая малые величины коэффициентов ФРО, характерные для сплавов со слабой анизотропией упругих свойств, из уравнений (1)–(3) можно получить:

$$\Delta v(\varepsilon) \approx k_v \Delta W_{400}(\varepsilon). \quad (7)$$

Величины v_τ и v_l определялись как: $v_\tau = (v_{zx} + v_{zy})/2$, $v_l = v_{zz}$. Аналогично для времен распространения упругих волн: $t_\tau = (t_{zx} + t_{zy})/2$, $t_l = t_{zz}$. График зависимости коэффициента Пуассона от величины пластической деформации так же, как и для коэффициента ФРО W_{400} , имеет стадийность (рис. 3а). Как и предполагалось (7), связь коэффициента Пуассона с коэффициентом ФРО W_{400} можно аппроксимировать линейной зависимостью (рис. 3б).

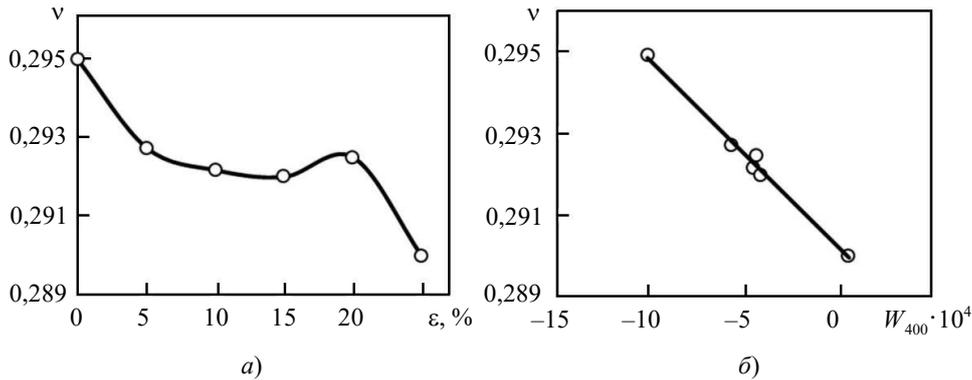


Рис. 3. Зависимость коэффициента Пуассона от величины пластической деформации (а), связь коэффициента Пуассона с коэффициентом ФРО W_{400} (б)

В выражении (7) $k_v = -4,57$. Из выражений (5) и (7) для соотношения $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ получим:

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta v/k_v - k_0 - k_1\varepsilon}{k_2 + k_3\varepsilon}. \quad (8)$$

На рис. 1б показаны зависимость упрочнения $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ от величины деформации, полученной из кривой растяжения $\sigma(\varepsilon)$ (сплошная линия), и кривая, полученная из выражения (8) (штриховая линия). Исходя из (3), можно записать $\Delta A_1 \approx k_A \Delta W_{420}$. Используя упругие константы, приведенные в методике выше, получим $k_A = -7,77$. Связь изменения величины акустической анизотропии A_1 с величиной пластической деформации хорошо аппроксимируется выражением:

$$\Delta A_1 = k_{1\varepsilon} \varepsilon_1 + k_{2\varepsilon} \varepsilon_1^2, \quad (9)$$

где $k_{1\varepsilon} = 0,369$, $k_{2\varepsilon} = -0,0083$. Исходя из (9), величину пластической деформации можно определить по данным акустических измерений по формуле:

$$\varepsilon = \frac{k_{1\varepsilon} + \sqrt{k_{1\varepsilon}^2 - 4k_{2\varepsilon}\Delta A_1}}{2k_{2\varepsilon}}. \quad (10)$$

Коэффициент корреляции между величиной пластической деформации (до образования шейки) с ее расчетным значением (10) составляет 0,98, погрешность измерения пластической деформации – не более 0,3%. Таким образом, определяя коэффициент Пуассона и параметр акустической анизотропии A_1 , можно с помощью акустических измерений оценить величину упрочнения и величину деформации, не разрушая конструкции. Мониторинг динамики изменения коэффициента Пуас-

сона позволяет идентифицировать стадии разрушения материала: стадию текучести, характеризуемую площадкой текучести, стадию упрочнения и образования шейки.

Заключение

Исследование влияния пластического деформирования на характеристики текстуры низколегированной стали 09Г2С акустическим методом показало, что характерные участки на диаграмме растяжения (площадка текучести; участок, соответствующий параболическому упрочнению; начало образования шейки) имеют соответствующие отображения на динамике изменения коэффициентов ФРО.

Площадка текучести характеризуется активным изменением текстуры. Упрочнение материала приводит к замедлению интенсивности изменения коэффициентов ФРО. Показано, что коэффициент Пуассона при малой анизотропии упругих свойств линейно связан с коэффициентом ФРО W_{400} , а параметр акустической анизотропии – с W_{420} . Получены выражения, связывающие изменения коэффициента Пуассона с величиной упрочнения, параметра акустической анизотропии – с величиной пластической деформации. Таким образом, мониторинг упругих характеристик позволяет определить состояние пластически деформированной стали.

Список литературы

1. Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z.L. Prediction of the mechanical properties of P91 steel by means of magneto-acoustic emission and acoustic birefringence. *Journal of Non-destructive Evaluation*. 2017. Vol. 36. Iss. 2. P. 43–1–43–10. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0421-9>.
2. Serbin E.D., Kostin V.N., Vasilenko O.N., Ksenofontov D.G., Gerasimov E.G., Terentev P.B. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics of low-carbon steel and diagnostics of its structural state. *Independent Nondestructive Testing and Evaluation*. 2020. Vol. 116. P. 102330-1–102330-7. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102330>.
3. Tretyakov D.A., Belyaev A.K. Surface effect of acoustic anisotropy during plastic deformation of metals. *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2176. P. 020011-1–020011-4. <https://doi.org/10.1063/1.5135123>.
4. Ivanova Y., Partalin T., Pashkuleva D. Acoustic investigations of the steel samples deformation during the tensile. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. Vol. 53. P. 39–50. <https://doi.org/10.1134/S1061830917010077>.
5. Barannikova S., Lunev A., Li Y., Zuev L. Use of acoustic parameter measurements for evaluating the reliability criteria of machine parts and metalwork. *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 743. P. 486–489. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.743.486>.
6. Allen D.R., Sayers C.M. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique. *Ultrasonics*. 1984. Vol. 22. Iss. 4. P. 179–188. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(84\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(84)90034-9).
7. Hirao M., Aoki K., Fukuoka H. Texture of polycrystalline metals characterized by ultrasonic velocity measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1987. Vol. 81. Iss. 5. P. 1434–1440. <https://doi.org/10.1121/1.394495>.
8. Sayers C. M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1982. Vol. 15. No 11. P. 2157–2167. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/15/11/011>.
9. Caiulo A., Kachanov M. On absence of quantitative correlations between strength and stiffness in microcracking materials. *International Journal of Fracture*. 2010. Vol. 164. P. 155–158. DOI: 10.1007/s10704-010-9486-5
10. *Новые методы исследования текстуры поликристаллических материалов: Сб. статей.* Под ред. И.И. Папирова, Т.И. Савеловой. М.: Металлургия, 1985. 312 с.

11. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kirikov S.V., Klyushnikov V.A. Evaluation of condition of low-carbon steels experiencing plastic deformation using the effect of acoustic birefringence. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2021. Vol. 36. Iss. 2. P. 225–235. <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1728266>.
12. Золоторевский Н.Ю., Рыбин В.В. *Фрагментация и текстурообразование при деформации металлических материалов*. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2014. 207 с.
13. Золоторевский Н.Ю. *Фазовые равновесия и структурообразование. Моделирование структурных превращений в металлических материалах*. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2007. 163 с.
14. Tang S., Kobayashi M. Comparison of ultrasonic pole figures based upon ultrasonic nondestructive evaluation method with pole figures based upon finite element polycrystal model. *JSME International Journal Series A: Solid Mechanics and Material Engineering*. 2003. Vol. 46. Iss. 1. P. 76–85 <https://doi.org/10.1299/jsmea.46.76>.
15. Kobayashi M., Tang S. Theoretical examination of ultrasonic pole figures via comparison with the results analyzed by finite element polycrystal model. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2004. Vol. 115. P. 637–650. <https://doi.org/10.1121/1.1642763>.
16. Spies M., Schneider E. Nondestructive analysis of textures in rolled sheets by ultrasonic techniques. *Textures and Microstructures*. 1990. Vol. 12. P. 219–231. DOI: 10.1155/tsm.12.219.
17. Bunge H.-J. *Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Methods*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1982. 593 p.
18. Davis C.L., Strangwood M., Potter M., Dixon S., Morris P.F. Prediction of elastic modulus + anisotropy using X-ray and electron backscattered diffraction texture quantification and ultrasonic (Electromagnetic Acoustic Transducer) measurements in aluminum sheets. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2008. Vol. 39. P. 679–687. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9439-4>.
19. Potter M.D.G., Dixon S. Ultrasonic texture measurement of sheet metals: An integrated system combining Lamb and shear wave techniques. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2005. Vol. 20. Iss. 4. P. 201–210. <https://doi.org/10.1080/10589750500424294>.
20. Kim S.A., Johnson W.L. Elastic constants and internal friction of martensitic steel, ferritic-pearlitic steel, and α -iron. *Materials Science and Engineering: A*. 2007. Vol. 452–453. P. 633–639. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.147>.
21. Cottrell A.H., Bilby B.A. Dislocation theory of yielding and strain ageing of iron. *Proceedings of the Physical Society. Section A*. 1949. Vol. 62. No 1. P. 62–49.
22. Фридель Ж. *Дислокации*. М.: Мир, 1967. 643 с.
23. Хирт Дж., Лоте И. *Теория дислокаций*. М.: Атомиздат, 1972. 600 с.
24. Серебряный В.Н., Мишакин В.В., Гончар А.В. Акустические и рентгенографические параметры текстуры и константы упругости малоуглеродистой стали до и после усталостных испытаний. *Деформация и разрушение материалов*. 2020. №2. С. 16–20. DOI: 10.31044/1814-4632-2020-2-16-20.
25. Mishakin V., Klyushnikov V., Gonchar A., Kachanov M. Estimating fatigue damage of austenitic steel by combining the ultrasonic with eddy current monitoring. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. Vol. 38. Iss. 1. P. 4-1–4-4. DOI:10.1007/s10921-018-0541-x.
26. Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M. Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data. *International Journal of Fatigue*. 2020. Vol. 141. No 105846. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105846>.
27. *Nondestructive Testing and Diagnostics: Handbook*. Eds. V.V. Klyuev, G.V. Zusman. Moscow–Houston: RSNTTD and Metrix Instrument Co, 2004. 656 p.

References

1. Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z.L. Prediction of the mechanical properties of P91 steel by means of magneto-acoustic emission and acoustic birefringence. *J. Nondestruct Eval*. 2017. Vol. 36. Iss. 2. P. 43-1–43-10. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0421-9>.
2. Serbin E.D., Kostin V.N., Vasilenko O.N., Ksenofontov D.G., Gerasimov E.G., Terentev P.B. Influence of the two-stage plastic deformation on the complex of the magnetoacoustic characteristics

- of low-carbon steel and diagnostics of its structural state. *NDT & E International*. 2020. Vol. 116. P. 102330-1–102330-7. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102330>.
3. Tretyakov D.A., Belyaev A.K. Surface effect of acoustic anisotropy during plastic deformation of metals. *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2176. P. 020011-1–020011-4. <https://doi.org/10.1063/1.5135123>.
 4. Ivanova Y., Partalin T., Pashkuleva D. Acoustic investigations of the steel samples deformation during the tensile. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017. Vol. 53. P. 39–50. <https://doi.org/10.1134/S1061830917010077>.
 5. Barannikova S., Lunev A., Li Y., Zuev L. Use of acoustic parameter measurements for evaluating the reliability criteria of machine parts and metalwork. *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 743. P. 486–489. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.743.486>.
 6. Allen D.R., Sayers C.M. The measurement of residual stress in textured steel using an ultrasonic velocity combinations technique. *Ultrasonics*. 1984. Vol. 22. Iss. 4. P. 179–188. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(84\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0041-624X(84)90034-9).
 7. Hirao M., Aoki K., Fukuoka H. Texture of polycrystalline metals characterized by ultrasonic velocity measurements. *J. Acoust. Soc. Am.* 1987. Vol. 81. Iss. 5. P. 1434–1440. <https://doi.org/10.1121/1.394495>.
 8. Sayers C. M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1982. Vol. 15. No 11. P. 2157–2167. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/15/11/011>.
 9. Caiulo A., Kachanov M. On absence of quantitative correlations between strength and stiffness in microcracking materials. *Int. J. Fract.* 2010. Vol. 164. P. 155–158. DOI: 10.1007/s10704-010-9486-5.
 10. *Novye metody issledovaniya tekstury polikristallicheskih materialov*: Sb. statey. Pod red. I.I. Papirova, T.I. Savelovoy [*New Methods for Studying the Texture of Polycrystalline Materials*. Collection of articles. Eds. I.I. Papirova, T.I. Savelova]. Moscow. Metallurgiya Publ. 1985. 312 p. (In Russian).
 11. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kirikov S.V., Klyushnikov V.A. Evaluation of condition of low-carbon steels experiencing plastic deformation using the effect of acoustic birefringence. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2021. Vol. 36. Iss. 2. P. 225–235. <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1728266>.
 12. Zolotarevsky N.Yu., Rybin V.V. *Fragmentatsiya i teksturoobrazovanie pri deformatsii metallicheskih materialov* [*Fragmentation and Texture Formation during Deformation of Metal Materials*]. Saint Petersburg. Politekhicheskiy universitet Publ. 2014. 207 p. (In Russian).
 13. Zolotarevsky N.Yu. *Fazovye ravnovesiya i strukturoobrazovanie. Modelirovanie strukturykh prevrashcheniy v metallicheskih materialakh* [*Phase Equilibria and Structure Formation. Modeling of Structural Transformations in Metallic Materials*]. Saint Petersburg. Politekhicheskiy universitet Publ. 2007. 163 p. (In Russian).
 14. Tang S., Kobayashi M. Comparison of ultrasonic pole figures based upon ultrasonic nondestructive evaluation method with pole figures based upon finite element polycrystal model. *JSME International Journal Series A: Solid Mechanics and Material Engineering*. 2003. Vol. 46. Iss. 1. P. 76–85 <https://doi.org/10.1299/jsmea.46.76>.
 15. Kobayashi M., Tang S. Theoretical examination of ultrasonic pole figures via comparison with the results analyzed by finite element polycrystal model. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. Vol. 115. P. 637–650. <https://doi.org/10.1121/1.1642763>.
 16. Spies M., Schneider E. Nondestructive analysis of textures in rolled sheets by ultrasonic techniques. *Textures and Microstructures*. 1990. Vol. 12. P. 219–231. DOI: 10.1155/tsm.12.219.
 17. Bunge H.-J. *Texture Analysis in Materials Science: Mathematical Methods*. Oxford. Butterworth-Heinemann. 1982. 593 p.
 18. Davis C.L., Strangwood M., Potter M., Dixon S., Morris P.F. Prediction of elastic modulus + anisotropy using X-ray and electron backscattered diffraction texture quantification and ultrasonic (Electromagnetic Acoustic Transducer) measurements in aluminum sheets. *Metall. Mater. Trans.* 2008. Vol. 39. P. 679–687. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9439-4>.
 19. Potter M.D.G., Dixon S. Ultrasonic texture measurement of sheet metals: An integrated system combining Lamb and shear wave techniques. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2005. Vol. 20. Iss. 4. P. 201–210. <https://doi.org/10.1080/10589750500424294>.

20. Kim S.A., Johnson W.L. Elastic constants and internal friction of martensitic steel, ferritic-pearlitic steel, and α -iron. *Mater. Sci. Eng. A*. 2007. Vol. 452–453. P. 633–639. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.147>.
21. Cottrell A.H., Bilby B.A. Dislocation theory of yielding and strain ageing of iron. *Proc. Phys. Soc. A*. 1949. Vol. 62. No 1. P. 62–49.
22. Friedel J. *Dislocations*. Oxford. London. Edinburg. Pergamon. 1964. 512 p.
23. Hirth J.P., Lothe J. *Theory of Dislocations*. New York. McGraw-Hill. 1968. 780 p.
24. Serebryanyi V.N., Mishakin V.V., Gonchar A.V. Acoustic and X-ray diffraction texture parameters and the elastic constants of low-carbon steel before and after fatigue tests. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. 2020. No 10. P. 1142–1146. DOI: 10.1134/s0036029520100225.
25. Mishakin V., Klyushnikov V., Gonchar A., Kachanov M. Estimating fatigue damage of austenitic steel by combining the ultrasonic with eddy current monitoring. *J. Nondestr. Eval.* 2019. Vol. 38. Iss. 1. P. 4-1–4-4. DOI: 10.1007/s10921-018-0541-x.
26. Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M. Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data. *Int. J. Fatigue*. 2020. Vol. 141. No 105846. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105846>.
27. *Nondestructive Testing and Diagnostics: Handbook*. Eds. V.V. Klyuev, G.V. Zusman. Moscow. Houston. RSNTTD and Metrix Instrument Co. 2004. 656 p.

**STUDY OF THE EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION
ON THE CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE AND ACOUSTIC CHARACTERISTICS
OF LOW-ALLOY STEEL**

Mishakin V.V., Gonchar A.V., Klushnikov V.A., Kurashkin K.V.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences – Branch
of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The article presents the results of a study of the influence of plastic deformation on the change in the coefficients of the orientation distribution function (ODF) W_{400} and W_{420} of low-alloy steel 09G2S. To calculate the ODF coefficients, the velocities and times of propagation of shear and longitudinal bulk elastic waves and their ratios were used. The physical interpretation of the ODF coefficients W_{400} and W_{420} is given. The W_{420} coefficient depicts the effect of birefringence of shear bulk elastic waves, the W_{400} ratio is linearly related to Poisson's ratio. Both coefficients are structurally sensitive characteristics and are used to assess the state of materials by non-destructive testing methods. As a results of the study, it was found that the characteristic areas on the tension diagram: the yield area, the area corresponding to parabolic hardening, the beginning of neck formation, have a corresponding display on the dynamics of changes in the coefficients of the orientation distribution function.

The yield area is characterized by an active change in the characteristics of the texture. Hardening leads to a decrease in the intensity of change in the coefficients of the orientation distribution function. Expressions are given that relate changes in Poisson's ratio to the value of hardening of the steel under study, the parameter of acoustic anisotropy with the value of plastic deformation. The calculated values of the hardening value according to the data of acoustic measurements are in good agreement with the hardening value obtained by analyzing the tensile diagram. The error in determining the magnitude of plastic deformation by the acoustic method was no more than 0.3%. It was found that monitoring the elastic characteristics by the acoustic method makes it possible to effectively assess the state of plastically deformed steel by a non-destructive testing method.

Keywords: plastic deformation, strain hardening, crystallographic texture, coefficients of the orientation distribution function, ultrasonic method.