

УДК 531/534; 620.179.162; 620.192.4

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-2-259-271

**ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ
НА АНИЗОТРОПИЮ УПРУГИХ СВОЙСТВ
И СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН
В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ***

© 2022 г.

**Гончар А.В.¹, Курашкин К.В.¹,
Сергеева О.А.², Соловьев А.А.³**

¹*Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального
исследовательского центра «Институт прикладной физики РАН», Нижний
Новгород, Российская Федерация*

²*ООО «Волга-СГЭМ» – «Камспецэнерго», Набережные Челны,
Российская Федерация*

³*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация*

avg-ndt@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния пластического деформирования на скорости распространения сдвиговых, продольных и головных волн в горячекатаной тонколистовой стали 20. Плоские образцы, вырезанные вдоль и поперек направления прокатки листа, подвергались поэтапному одноосному растяжению с шагом остаточной деформации 4%. Диаграммы растяжения, полученные для образцов, имеют характерную для низкоуглеродистой стали площадку текучести. После каждого этапа образцы разгружались и проводились структурно-чувствительные ультразвуковые измерения с помощью датчиков сдвиговых, продольных и головных волн. Получено, что скорости сдвиговых и продольных волн слабо изменяются до момента потери локальной устойчивости, а скорость головных волн монотонно и практически линейно уменьшается в зависимости от пластической деформации. Исследовано изменение анизотропии упругих свойств материала при пластическом деформировании: получены монотонные зависимости параметра акустической анизотропии (двулучепреломления сдвиговых волн) и относительной разности скоростей продольных и головных волн от степени остаточной пластической деформации. Представленные ультразвуковые исследования позволяют получить информацию об изменениях в структуре материала, вызванных пластической деформацией: эволюции текстуры и накоплении микрповреждений. Получены корреляционные связи между параметром повреждения материала и параметрами анизотропии упругих свойств, которые могут использоваться для ультразвукового контроля состояния пластически деформированной стали.

* Выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант №21-79-10395).

Дополнительные оптические исследования эволюции микроструктуры на поверхности показали, что в процессе пластического деформирования происходят повороты зерен и локализация пластической деформации (полосы Людερса – Чернова), о чем свидетельствует расфокусирование отдельных микроучастков изображения, также в отдельных зернах образуются грубые полосы скольжения.

Ключевые слова: пластическая деформация, акустическая анизотропия, головные волны, скорость упругих волн, ультразвуковой метод.

Введение

В процессе пластического деформирования поликристаллический материал, например конструкционная сталь, претерпевает сложные структурные изменения, включая изменение текстуры и накопление микроповреждений, которые влияют на упругие и акустические характеристики материала, в том числе и на параметры распространения ультразвуковых волн. Следовательно, различные структурно-чувствительные способы ультразвукового контроля могут быть использованы для оценки состояния материала, испытывающего пластическую деформацию. Среди них хорошо известны способы, основанные на измерении скорости [1–5], затухания [5–8], параметра акустической анизотропии (двулучепреломления) [6, 9–13], параметра нелинейности [5, 14–17]. Ранее [18] на примере низколегированной стали 09Г2С было показано, что определяемые ультразвуковым методом коэффициент Пуассона и параметр акустической анизотропии линейно связаны с характеристиками текстуры – коэффициентами функции распределения ориентировок [19, 20]. Мониторинг упругих характеристик материала, определяемых ультразвуковым методом, дает возможность определить состояние пластически деформированной стали.

С инженерной точки зрения ультразвук имеет ряд важных преимуществ. Во-первых, ультразвуковой контроль доступен и эффективен и может быть легко применен в полевых условиях. Во-вторых, ультразвуковые волны обеспечивают интегральную оценку состояния материала, в котором они распространяются. Скорость распространения упругих волн различного вида и поляризации является одной из основных акустических характеристик материала. Из-за широкого распространения и доступности чаще используют датчики продольных и сдвиговых волн и, зная толщину материала, рассчитывают скорости их распространения. При одностороннем доступе к элементу конструкции используют времена распространения и различные их комбинации [21]. Иногда в исследованиях применяют распространяющиеся вблизи поверхности материала волны Рэлея. Сложность их корректного применения для определения степени деградации структурного состояния материала конструкции связана, в первую очередь, с их чувствительностью к состоянию поверхности. Довольно редко используются головные волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности материала. Волны такого типа распространяются в подповерхностном слое со скоростью продольной волны. Они не чувствительны к состоянию поверхности, а толщину прозвучиваемого подповерхностного слоя можно изменять, используя разную частоту излучения.

В предлагаемой статье представлены новые результаты лабораторных экспериментов, в которых исследовано влияние пластической деформации при одноосном растяжении на скорости распространения продольных, сдвиговых и головных ультразвуковых волн в образцах из тонколистовой горячекатаной углеродистой стали 20.

Связь скоростей ультразвуковых волн с упругими характеристиками

Для ортотропного материала (рис. 1), такого как стальной прокат, связи между упругими константами и скоростями ультразвуковых волн выражаются соотношениями [22]:

$$\rho V_{zx}^2 = C_{55}, \quad \rho V_{zy}^2 = C_{44}, \quad \rho V_{zz}^2 = C_{33}, \quad \rho V_{xx}^2 = C_{11}, \quad (1)$$

где V_{zx} и V_{zy} – скорости сдвиговых волн, распространяющихся по толщине и поляризованных вдоль и поперек оси растяжения соответственно; V_{zz} – скорость продольной волны, распространяющейся по толщине; V_{xx} – скорость головной (критически преломленной продольной) волны, распространяющейся в приповерхностном слое вдоль оси растяжения; C_{11} , C_{33} , C_{44} , C_{55} – модули упругости; ρ – плотность материала. На рисунке обозначено: 1 – датчик ультразвуковых волн, 2 – образец.

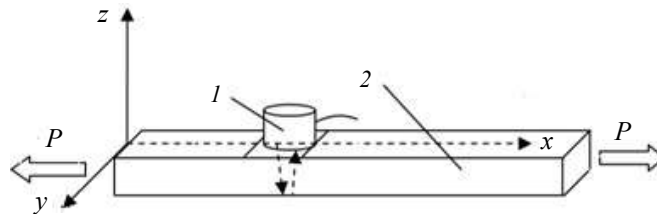


Рис. 1. Расположение осей относительно образца и направления распространения ультразвуковых волн

Анизотропию упругих свойств можно характеризовать, например, параметром акустической анизотропии:

$$A = \frac{C_{55} - C_{44}}{C_{55} + C_{44}} = 2 \frac{V_{zx} - V_{zy}}{V_{zx} + V_{zy}}. \quad (2)$$

По аналогии со сдвиговыми волнами для продольных волн можно записать:

$$B = \frac{C_{33} - C_{11}}{C_{33} + C_{11}} = 2 \frac{V_{zz} - V_{xx}}{V_{zz} + V_{xx}}. \quad (3)$$

В процессе пластического деформирования происходит изменение упругих свойств и, соответственно, акустических характеристик материала. Далее приводится сравнение интенсивности изменения скоростей распространения упругих волн различного типа и поляризации, а также параметров A и B с учетом погрешности измерений.

Методика эксперимента

Для исследований была выбрана сталь 20, широко применяемая для изготовления сварных сосудов высокого давления, труб и строительных конструкций. Состояние поставки – горячекатаный лист толщиной 3 мм. Фактический химический состав: основа Fe, 0,20%С, 0,24%Si, 0,37%Mn, менее 0,01%S и менее 0,01%Р.

Для проведения эксперимента были изготовлены два плоских образца прямоугольного сечения (рис. 2а). Один образец был вырезан из листа вдоль направления прокатки, другой – поперек. Размеры рабочей зоны образцов 50×10×3 мм. Оба образца подвергались одноосному растяжению с помощью сервогидравлической испытательной машины.

тельной машины BISS Nano UT-01-0025 (рис. 2б). Одноосное растяжение проводилось поэтапно, около 4% на каждом этапе, при скорости деформации 10^{-3} с^{-1} . Величина и скорость деформации контролировались с помощью экстензометра BISS AC-07-1005.

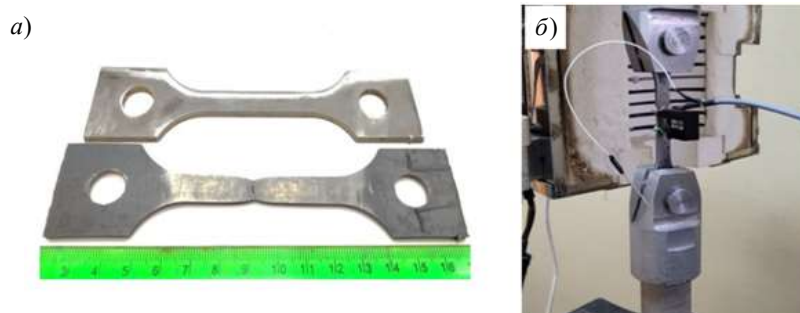


Рис. 2. Внешний вид исходного и разрушенного образцов (а); образец в захватах испытательной машины с установленным экстензометром (б)

До механических испытаний на каждом образце подготавливались микрошлифы. Сначала поверхность образцов механически шлифовалась и полировалась, а затем травилась 5%-ным водным раствором азотной кислоты для выявления границ зерен. Наблюдение микроструктуры проводилось с помощью оптического микроскопа Altami MET 3M. Также до механических испытаний рабочая зона образцов размечалась на 8 участков по 6 мм, где проводились ультразвуковые измерения. После каждого этапа растяжения образец вынимался из испытательной машины; в свободном ненагруженном состоянии выполнялись ультразвуковые измерения и металлографические исследования; затем образец снова помещался в испытательную машину и подвергался следующему этапу пластического деформирования. Этапы растяжения для каждого образца повторялись до образования шейки. Эксперимент проводился при комнатной температуре.

Ультразвуковые измерения проводились с помощью специально разработанной установки (рис. 3). На рисунке представлено: 1 – генератор электрических импульсов, 2 – установленный на образце пьезоэлектрический преобразователь, 3 – цифровой осциллограф, 4 – ноутбук. Эхо-методом измерялись времена распространения по толщине образца одной продольной и двух сдвиговых волн. Время распространения головной волны вдоль оси растяжения измерялось специально разработанным малогабаритным акустическим блоком, в котором реализована дифференциальная схема (один излучающий и два приемных датчика).

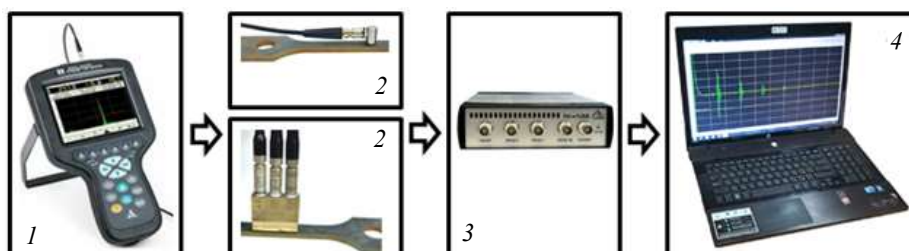


Рис. 3. Схема установки для ультразвуковых измерений

Ультразвуковой дефектоскоп АКС А1212 MASTER использовался в качестве генератора электрических импульсов. Широкополосные пьезоэлектрические преобразователи Olympus V157 и V1091 (диаметр 3 мм, центральная частота 5 МГц) применялись для возбуждения и приема сдвиговых и продольных волн соответственно. Блок пьезоэлектрических преобразователей Алтес ПЗ21-10-33/90ГВ (частота 10 МГц, измерительная база 5,4 мм) применялся для возбуждения и приема головных волн. Цифровой осциллограф LA-n1USB и программное обеспечение ADCLab использовались для сохранения амплитудно-временной диаграммы в компьютере для дальнейшей обработки. Частота дискретизации составляла 1 ГГц, разрешение по времени – 1 нс. Более подробно принцип работы акустической установки описан в [23].

Времена распространения двух сдвиговых волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль t_{zx} и поперек t_{zy} оси растяжения, измерялись между вторым и третьим эхо-импульсами. Время распространения продольной волны t_{zz} измерялось между вторым и третьим эхо-сигналами. Время распространения головной волны t_{xx} измерялось между сигналами с первого и второго приемных преобразователей. За синфазные точки в импульсах принимались точки пересечения нуля на переходе с минимума на максимум в сигнале. На каждом участке измерения повторялись 5 раз, а затем усреднялись. Абсолютная погрешность измерения времени распространения составляла не более 1 нс для сдвиговых волн, 1 нс для продольных волн и 1 нс для головных волн.

Скорость ультразвуковых волн определялась как соответствующее отношение длины пути, пройденного волной, к времени распространения волны. Скорость сдвиговой волны, распространяющейся по толщине и поляризованной вдоль оси растяжения:

$$V_{zx} = \frac{2h}{t_{zx}}. \quad (4)$$

Скорость сдвиговой волны, распространяющейся по толщине и поляризованной поперек оси растяжения:

$$V_{zy} = \frac{2h}{t_{zy}}. \quad (5)$$

Скорость продольной волны, распространяющейся по толщине:

$$V_{zz} = \frac{2h}{t_{zz}}. \quad (6)$$

Скорость головной (критически преломленной продольной) волны, распространяющейся в приповерхностном слое вдоль оси растяжения:

$$V_{xx} = \frac{L_0}{t_{xx}}. \quad (7)$$

Здесь h – толщина образца на данном участке, изменяется при пластическом деформировании; L_0 – база измерений головных волн, постоянная величина. Толщина образца измерялась с помощью микрометра в каждой зоне, где проводились ультразвуковые исследования, после каждого этапа растяжения.

Параметр акустической анизотропии рассчитывался из соотношения времен распространения сдвиговых волн, распространяющихся по толщине и поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль и поперек оси растяжения:

$$A = 2 \frac{t_{zy} - t_{zx}}{t_{zx} + t_{zy}}. \quad (8)$$

Параметр B рассчитывался как относительная разность скоростей продольных и головных волн по формуле (3). Изменения параметров ΔA и ΔB рассчитывались как разность между последующим его значением и исходным. Скорости ультразвуковых волн, акустическая анизотропия и параметр B в образце определялись как средние значения измерений на 8 участках. Погрешность определения параметра A не превышала $4 \cdot 10^{-4}$, параметра B – $6 \cdot 10^{-3}$.

Результаты испытаний

Диаграммы растяжения, полученные для обоих образцов (рис. 4), имеют характерную для низкоуглеродистой стали площадку текучести. Для образца, вырезанного вдоль направления прокатки, предел текучести составил 285 ± 5 МПа, предел выносливости – 445 ± 5 МПа. Для образца, вырезанного поперек направления прокатки, предел текучести составил 303 ± 5 МПа, предел выносливости – 458 ± 5 МПа.

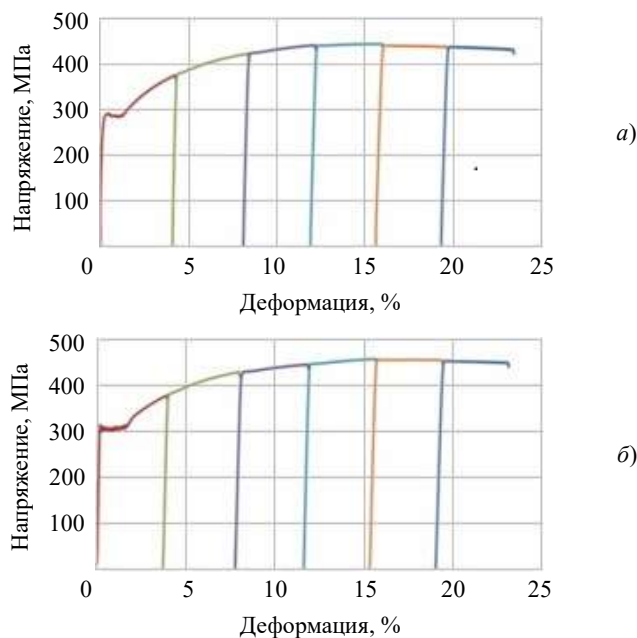


Рис. 4. Диаграммы поэтапного растяжения для двух образцов, вырезанных вдоль (а) и поперек (б) направления прокатки

В результате металлографических исследований были получены изображения микроструктуры одной и той же области наблюдения до испытаний и после каждого этапа деформирования.

В исходном состоянии микроструктура образцов однородная, состоит из зерен феррита с небольшим количеством перлита. Средний размер зерна составляет 10 мкм, а отношение площади, занимаемой перлитом, к площади, занимаемой ферритом, составляет 5/95.

Начиная с величины пластической деформации 8%, в зернах феррита образуются грубые полосы скольжения. При последующем деформировании количество полос и их ширина и контрастность увеличиваются. При прохождении фронта Людерса – Чернова происходит локализация пластической деформации, из-за чего происходит расфокусировка отдельных участков изображения. Для устранения это-

го эффекта при получении целостного изображения применялся мультифокус (рис. 5).

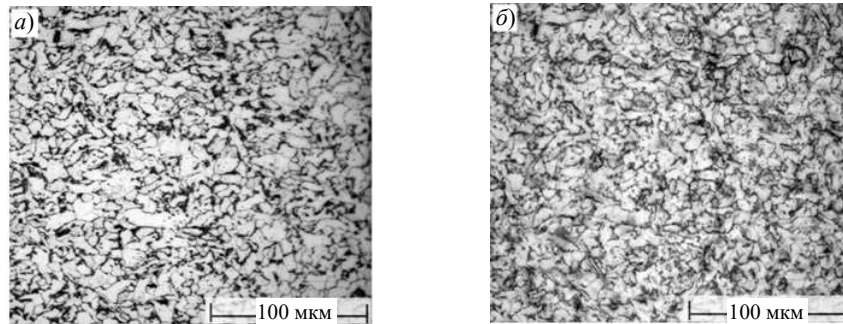


Рис. 5. Микроструктура стали 20:
а) до деформации, б) после пластической деформации 24% (мультифокус)

В результате ультразвуковых измерений для обоих образцов были получены зависимости скоростей продольных, сдвиговых и головных волн, а также параметров анизотропии от степени пластической деформации. На рис. 6 представлены графики: а) для поляризованных вдоль направления растяжения сдвиговых волн, б) для поляризованных поперек направления растяжения сдвиговых волн, в) для продольных волн, г) для головных волн. Представленные на рисунках величины являются значениями, усредненными по всем исследованным зонам. Необходимо отметить, что изменения в каждой конкретной зоне могут быть немонотонными, так как материал обладает исходной структурной неоднородностью, которая развивается при пластическом деформировании [6, 18, 24, 25].

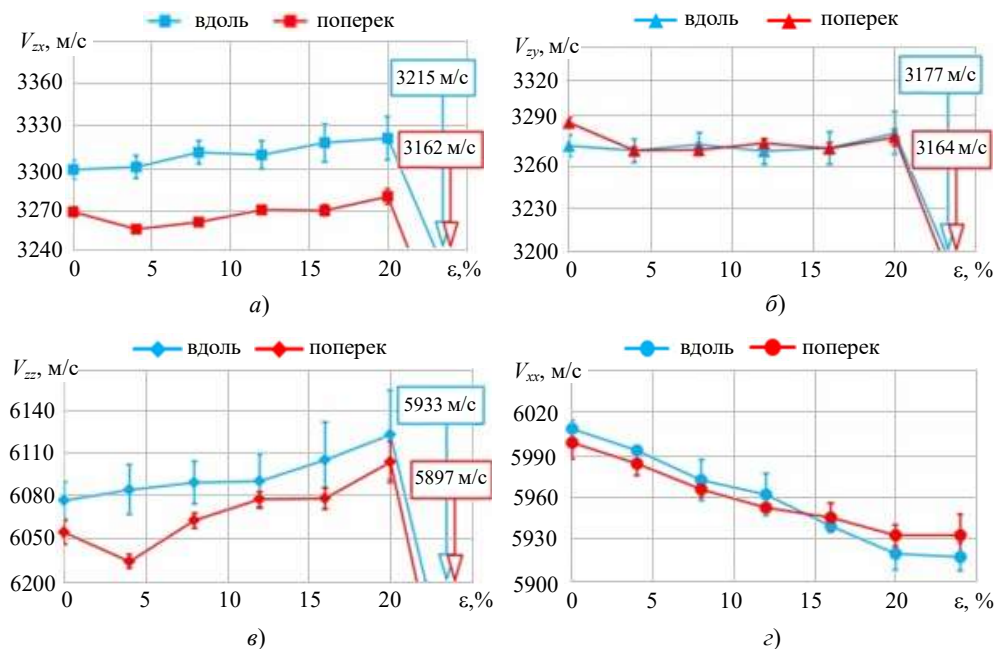


Рис. 6. Графики зависимости скорости распространения ультразвуковых волн от величины пластической деформации

Можно констатировать, что скорости сдвиговых и продольных волн слабо изменяются до момента потери локальной устойчивости. Напротив, скорость головных волн уменьшается монотонно по линейному закону в зависимости от величины пластической деформации.

Зависимости параметра акустической анизотропии и параметра B от величины пластической деформации представлены на рис. 7. Интенсивность изменения параметра акустической анизотропии не зависит от ориентации направления растяжения к направлению прокатки. Для обоих образцов приращение параметра A практически одинаково и имеет положительный знак.

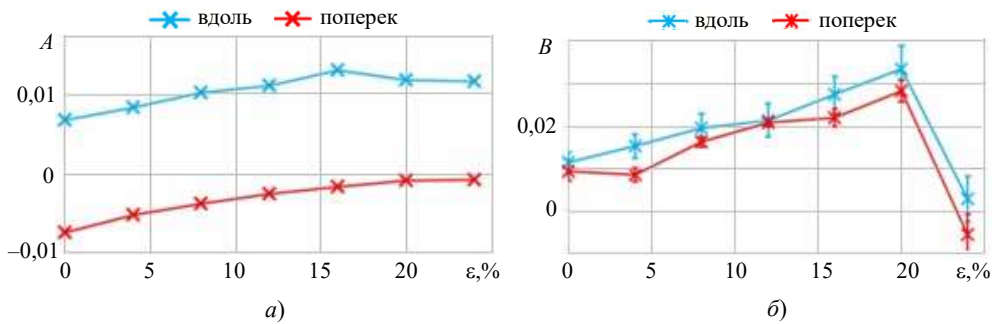


Рис. 7. Зависимости параметра акустической анизотропии (а) и параметра B (б) от величины пластической деформации

При образовании шейки в образце значения параметра акустической анизотропии практически не меняются, тогда как параметр B резко уменьшается. Изменение параметра акустической анизотропии связано в основном с поворотами зерен, на заключительной стадии деформирования образуются мезодефекты, которые препятствуют вращению зерен [13, 18, 26]. Также образование преимущественно ориентированных дефектов может приводить к уменьшению параметра акустической анизотропии [27].

Следует отметить, что численные значения скорости распространения головной волны и параметра акустической анизотропии могут быть определены без измерения толщины. Таким образом, с одной стороны, исключается важный источник погрешности измерения, а с другой стороны, это позволяет проводить исследование в условиях, в которых трудно или невозможно измерить толщину.

За одну из мер поврежденности материала можно принять исчерпание ресурса пластичности. Значение параметра поврежденности D было рассчитано на основе значений деформации в соответствии с соотношением, приведенным в [12]:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_f}, \quad (9)$$

где $\Delta \epsilon$ – шаг пластической деформации в направлении оси образца, ϵ_f – относительное удлинение при разрушении.

Связь параметра поврежденности D с параметром акустической анизотропии A (рис. 8а) можно представить в виде полинома второго порядка:

$$D = 57\Delta A + 10446(\Delta A)^2. \quad (10)$$

Связь параметра поврежденности D с параметром B (рис. 8б) можно представить в виде линейной зависимости:

$$D = 42\Delta B. \quad (11)$$

Полученные зависимости дают возможность использовать скорость распространения головных и продольных волн и параметр акустической анизотропии для контроля поврежденности при пластическом деформировании.

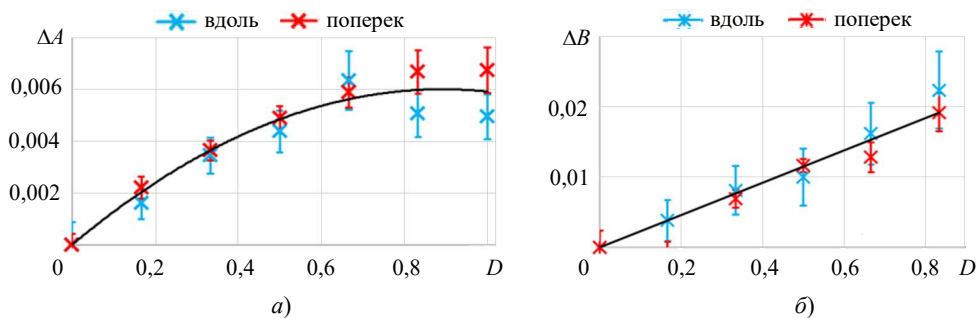


Рис. 8. Зависимости изменения параметра акустической анизотропии (а) и изменения параметра B (б) от поврежденности D

Заключение

Результат экспериментальных исследований влияния процесса пластического деформирования на изменение скоростей распространения сдвиговых, продольных и головных волн в плоских образцах, вырезанных из горячекатаного тонколистового проката стали 20 вдоль и поперек направления проката, показал, что интенсивность изменения скорости головных волн, распространяющихся вдоль оси деформирования, выше, чем у продольных и сдвиговых волн.

По аналогии с параметром акустической анизотропии для сдвиговых волн впервые предложен параметр, определяемый как относительная разность скоростей распространения продольной и головной волн.

Получены корреляционные связи поврежденности, ассоциированной с ресурсом пластичности материала и параметрами A и B , отражающими изменение упругой анизотропии.

Список литературы

1. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation – Part I. Theory. *International Journal of Plasticity*. 1998. Vol. 14. Iss. 6. P. 511–522. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(98\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(98)00005-9).
2. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation – Part II. Experiment and simulation. *International Journal of Plasticity*. 1998. Vol. 14. Iss. 6. P. 523–535. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(98\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(98)00006-0).
3. Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Бушмелева К.И. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации Al. *Журнал технической физики*. 2000. Вып. 1. С. 52–56.
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. Iss. 1. P. 39–50. <https://doi.org/10.1134/S1061830917010077>.
5. Wang X., Hu X., Chi Y., Xiao D. Damage assessment in structural steel subjected to tensile load using nonlinear and linear ultrasonic techniques. *Applied Acoustics*. 2019. Vol. 144. P. 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.07.006>.

6. 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.
7. Ерофеев В.И., Ромашов В.П. Влияние циклического нагружения и деформации материала на характеристики распространения продольной акустической волны. *Дефектоскопия*. 2004. №1. С. 59–64.
8. Ерофеев В.И., Никитина Е.А. Самосогласованная динамическая задача оценки повреждения материала акустическим методом. *Акустический журнал*. 2010. Т. 56. №4. С. 554–557.
9. Мишакин В.В., Ключников 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.
10. 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. Article No 43. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0421-9>.
11. Carvajal L., Artigas A., Monsalve A., Vargas Y. Acoustic birefringence and Poisson's ratio determined by ultrasound: tools to follow-up deformation by cold rolling and recrystallization. *Materials Research: Ibero-American Journal of Materials*. 2017. Vol. 20. P. 304–310. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-1082>.
12. Krysztolik J., Kukla D., Manaj W., Socha G. Evaluation of damage degree of Inconel 718 alloy with the use of non-destructive methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. Vol. 55. Iss. 4. P. 299–307. <https://doi.org/10.1134/S1061830919040107>.
13. 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>.
14. Korobov A.I., Brazhkin Y.A., Ning W. Nonlinear elasticity in structurally inhomogeneous materials: An experimental study. *Acoustical Physics*. 2005. Vol. 51. Iss. 5. P. 571–577. <https://doi.org/10.1134/1.2042577>.
15. Zhu W., Deng M., Xiang Y., Xuan F.Z., Liu C., Wang Y.N. Modeling of ultrasonic nonlinearities for dislocation evolution in plastically deformed materials: Simulation and experimental validation. *Ultrasonics*. 2016. Vol. 68. Iss. 10. P. 134–141. <http://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.02.016>.
16. Vanyagin A.V., Rodyushkin V.M. Measurement of acoustic nonlinearity of damaged metal. *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 60. Iss. 10. P. 1028–1031. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1312-x>.
17. Masurkar F., Tse P. Theoretical and experimental evaluation of the health status of a 1018 steel I-beam using nonlinear Rayleigh waves: Application to evaluating localized plastic damage due to impact loading. *Ultrasonics*. 2020. Vol. 108. Article No 106036. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.106036>.
18. Мишакин В.В., Гончар А.В., Ключников В.А., Курашкин К.В. Исследование влияния пластического деформирования на кристаллографическую текстуру и ультразвуковые характеристики низколегированной стали. *Проблемы прочности и пластичности*. 2021. Т. 83. №3. С. 255–264. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-255-264.
19. Hirao M., Aoki K., Fukuoka K. Texture of polycrystalline metals characterized by ultrasonic velocity measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1987. Vol. 81. Iss. 5. P. 1434–1440. <https://doi.org/10.1121/1.394495>.
20. Sayers C.M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates. *Journal of Applied Physics*. 1982. Vol. 53. No 11. P. 2157–2167. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/53/11/011>.
21. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Родюшкин В.М. и др. Определение механических напряжений с помощью поверхностных волн Рэлея, возбуждаемых магнитоакустическим преобразователем. *Дефектоскопия*. 2014. №12. С. 3–10.
22. Rose J.L. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. New York – Cambridge: Cambridge University, 1999. 454 p.

23. Мишакин В.В., Гончар А.В., Ключников В.А., Курашкин К.В., Фомин А.Е., Сергеева О.А. Контроль состояния циклически деформируемых нержавеющей сталей акустическим и вихретоковым методами. *Измерительная техника*. 2021. №2. С. 62–67. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-62-67>.
24. Беляев А.К., Лобачев А.М., Модестов В.С., Пивков А.В., Полянский В.А., Семенов А.С., Третьяков Д.А., Штукин Л.В. Оценка величины пластической деформации с использованием акустической анизотропии. *Изв. РАН. МТТ*. 2016. №5. С. 124–131.
25. Курашкин К.В. Исследование акустоупругого эффекта в анизотропном пластически деформированном материале. *Акустический журнал*. 2019. Т. 65. №3. С. 382–388. DOI: 10.1134/S0320791919030055.
26. Szelazek J., Mackiewicz S., Kowalewski Z.L. New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep. *NDT & E International*. 2009. Vol. 42. Iss. 2. P. 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.004>.
27. Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Andreeva O.V., Anosov M.S., Klyushnikov V.A. Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2022. Vol. 45. P. 101–112. <https://doi.org/10.1111/ffe.13586>.

References

1. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation – Part I. Theory. *Int. J. Plast.* 1998. Vol. 14. Iss. 6. P. 511–522. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(98\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(98)00005-9).
2. Kobayashi M. Ultrasonic nondestructive evaluation of microstructural changes of solid materials under plastic deformation – Part II. Experiment and simulation. *Int. J. Plast.* 1998. Vol. 14. Iss. 6. P. 523–535. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(98\)00006-0](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(98)00006-0).
3. Zuev L.B., Semukhin B.S., Bushmeleva K.I. Variation of the ultrasonic velocity in Al under plastic deformation. *Tech. Phys.* 2000. Vol. 45. Iss. 1. P. 50–54. <https://doi.org/10.1134/1.1259568>.
4. Ivanova Y., Partalin T., Pashkuleva D. Acoustic investigations of the steel samples deformation during the tensile. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2017. Vol. 53. Iss. 1. P. 39–50. <https://doi.org/10.1134/S1061830917010077>.
5. Wang X., Hu X., Chi Y., Xiao D. Damage assessment in structural steel subjected to tensile load using nonlinear and linear ultrasonic techniques. *Appl. Acoust.* 2019. Vol. 144. P. 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.07.006>.
6. Mishakin V.V., Naumov M.Y., Mishakin S.V., Kassina N.V. Development of an acoustic method for assessing the damage to metal alloys before formation of a macrocrack. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2007. Vol. 43. Iss. 10. P. 677–682. <https://doi.org/10.1134/S1061830907100075>.
7. Erofeev V.I., Romashov V.P. Effect of the cyclic loading and deformation of a material on the characteristics of propagation of a longitudinal acoustic wave. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2004. Vol. 40. Iss. 1. P. 46–50. <https://doi.org/10.1023/B:RUNT.0000036428.67936.7e>.
8. Erofeev V.I., Nikitina E.A. The self-consistent dynamic problem of estimating the damage of a material by an acoustic method. *Acoust. Phys.* 2010. Vol. 56. Iss. 4. P. 584–587. <https://doi.org/10.1134/S106377101004024X>.
9. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Kassina N.V. Research on the fracture process of steels by the acoustic method and the pitch net method. *J. Mach. Manuf. Reliab.* 2009. Vol. 38. Iss. 5. P. 443–447. <https://doi.org/10.3103/S1052618809050069>.
10. 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. Article No 43. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0421-9>.
11. Carvajal L., Artigas A., Monsalve A., Vargas Y. Acoustic birefringence and Poisson's ratio determined by ultrasound: tools to follow-up deformation by cold rolling and recrystallization. *Materials Research: Ibero-American Journal of Materials*. 2017. Vol. 20. P. 304–310. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-1082>.
12. Krysztolik J., Kukla D., Manaj W., Socha G. Evaluation of damage degree of Inconel 718 alloy with the use of non-destructive methods. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2019. Vol. 55. Iss. 4. P. 299–307. <https://doi.org/10.1134/S1061830919040107>.

13. 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. *Nondestruct. Test. Evaluation*. 2021. Vol. 36. Iss. 2. P. 225–235. <https://doi.org/10.1080/10589759.2020.1728266>.
14. Korobov A.I., Brazhkin Y.A., Ning W. Nonlinear elasticity in structurally inhomogeneous materials: An experimental study. *Acoust. Phys.* 2005. Vol. 51. Iss. 5. P. 571–577. <https://doi.org/10.1134/1.2042577>.
15. Zhu W., Deng M., Xiang Y., Xuan F.Z., Liu C., Wang Y.N. Modeling of ultrasonic nonlinearities for dislocation evolution in plastically deformed materials: Simulation and experimental validation. *Ultrasonics*. 2016. Vol. 68. Iss. 10. P. 134–141. <http://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.02.016>.
16. Vanyagin A.V., Rodyushkin V.M. Measurement of acoustic nonlinearity of damaged metal. *Meas. Tech.* 2018. Vol. 60. Iss. 10. P. 1028–1031. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1312-x>.
17. Masurkar F., Tse P. Theoretical and experimental evaluation of the health status of a 1018 steel I-beam using nonlinear Rayleigh waves: Application to evaluating localized plastic damage due to impact loading. *Ultrasonics*. 2020. Vol. 108. Article No 106036. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.106036>.
18. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Klushnikov V.A., Kurashkin K.V. Issledovanie vliyaniya plasticheskogo deformirovaniya na kristallograficheskuyu teksturu i ultrazvukovye kharakteristiki nizkolegirovannoy stali. [Study of the effect of plastic deformation on the crystallographic texture and acoustic characteristics of low-alloy steel]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2021. Vol. 83. P. 255–264 (In Russian).
19. Hirao M., Aoki K., Fukuoka K. 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>.
20. Sayers C.M. Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates. *J. Appl. Phys.* 1982. Vol. 15. No 11. P. 2157–2167. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/15/11/011>.
21. Khlybov A.A., Uglov A.L., Rodyushkin V.M. et al. The determination of mechanical stresses using Rayleigh surface waves excited by a magnetoacoustic transducer. *Russ. J. Nondest. Test.* 2014. Vol. 50. Iss. 12. P. 701–707. <https://doi.org/10.1134/S1061830914120055>.
22. Rose J.L. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. New York. Cambridge. Cambridge University. 1999. 454 p.
23. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Kurashkin K.V., Fomin A.E., Sergeeva O.A. Monitoring the state of stainless steel under cyclic deformation by the acoustic and eddy current methods. *Meas. Tech.* 2021. Vol. 64. Iss. 2. P. 145–150. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01909-1>.
24. Belyaev A.K., Lobachev A.M., Modestov V.S., Pivkov A.V., Polyanskii V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Shtukin L.V. Estimating the plastic strain with the use of acoustic anisotropy. *Mech. Solids*. 2016. Vol. 51. Iss. 5. P. 606–611. <https://doi.org/10.3103/S0025654416050149>.
25. Kurashkin K.V. Study of the acoustoelastic effect in an anisotropic plastically deformed material. *Acoust. Phys.* 2019. Vol. 65. Iss. 3. P. 316–321. <https://doi.org/10.1134/S1063771019030047>.
26. Szlezacek J., Mackiewicz S., Kowalewski Z.L. New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep. *NDTE Int.* 2009. Vol. 42. Iss. 2. P. 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.11.004>.
27. Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Andreeva O.V., Anosov M.S., Klyushnikov V.A. Fatigue life prediction of structural steel using acoustic birefringence and characteristics of persistent slip bands. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2022. Vol. 45. P. 101–112. <https://doi.org/10.1111/ffe.13586>.

**EFFECT OF STRAIN ON THE ELASTIC ANISOTROPY
AND ULTRASONIC WAVE VELOCITIES IN LOW-CARBON STEEL**

Gonchar A.V.¹, Kurashkin K.V.¹, Sergeeva O.A.², Solovyov A.A.³

¹*Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences –
Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*JSC “Volga-Spetsgidroenergmontazh” – “Kampetsenergo”, Naberezhnye Chelny,
Russian Federation*

³*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The results of experimental studies of the effect of plastic deformation on the velocities of transverse, longitudinal and head waves in hot-rolled sheet steel 20 are presented. Sheet-type specimens cut from the sheet along and across the rolling direction were tested in stages for uniaxial tension with a residual strain step of 4%. The tensile diagrams obtained for the specimens have the yield plateau, which is typical for low-carbon steel. After each stage, the specimens were unloaded and structurally sensitive ultrasonic measurements were carried out using shear, longitudinal and head wave transducers. It is found that the velocities of shear and longitudinal waves vary slightly until the moment of loss in local stability and the velocity of head waves decreases monotonically and in fact linearly with plastic deformation. The change in the anisotropy of the material elastic properties during plastic deformation is also investigated: monotonic dependences of the acoustic anisotropy parameter (birefringence of shear waves) and the relative difference in the velocities of longitudinal and head waves on the residual plastic strain are obtained. The presented ultrasonic investigations provide information about changes in the material structure due to plastic deformation: texture evolution and microdamage accumulation. Correlations between the material damage parameter and the elastic anisotropy parameters are obtained, which can be used for ultrasonic monitoring the state of plastically deformed steel.

Additional optical studies of microstructure evolution on the surface have shown that during plastic deformation, grain rotations and localization of plastic deformation (Luders–Chernov bands) occur, as evidenced by the defocusing of individual microzones of the image, and persistent slip bands are formed in individual grains.

Keywords: plastic deformation, ultrasonic wave velocity, anisotropy of elastic properties, ultrasonic damage monitoring.