

АНИЗОТРОПИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ТОНКОЛИСТОВОМ ПРОКАТЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ

© 2024 г. В.В. Муравьев^{1,2}, О.В. Муравьева^{1,2}, Л.В. Волкова^{1,*}, К.В. Колпак¹,
Д.И. Девятериков³, Е.А. Кравцов^{3,4}

¹ФГБОУ ВО ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7

²ФГБУН «УдмФИЦ УрО РАН», Россия 426067 Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

³Институт физики металлов УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

⁴Уральский федеральный университет, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: *ludmila396@istu.ru

Поступила в редакцию 17.09.2024; после доработки 04.10.2024

Принята к публикации 04.10.2024

Тонколистовой прокат из низкоуглеродистой марганцевистой стали 09Г2С толщиной 0,8 мм, имеющий сильную анизотропию свойств вследствие текстуры и остаточных напряжений, экспериментально исследован с помощью SH-волны горизонтальной поляризации и нулевой симметричной моды волны Лэмба. Анализировались скорости распространения вдоль листа упругих волн при изменении их направления и поляризации относительно направления проката в диапазоне углов от 0 до 180 град. Возбуждение и прием нормальных волн в листе осуществлялись пьезопреобразователями с сухим точечным контактом, обеспечивающих касательное силовое воздействие. Получены результаты исследований анизотропии акустических свойств, рентгеноструктурного анализа остаточных напряжений и обратных полюсных фигур и металлографических исследований.

Ключевые слова: низкоуглеродистая марганцевистая сталь, анизотропия свойств, скорость нормальных волн, остаточные напряжения, рентгеноструктурный анализ.

ANISOTROPY OF ACOUSTIC PROPERTIES IN THIN-SHEET ROLLED LOW-CARBON MANGANESE STEEL

© 2024 V.V. Murav'ev^{1,2}, O.V. Murav'eva^{1,2}, L.V. Volkova^{1,*}, K.V. Kolpakov¹,
D.I. Devyaterikov³, E.A. Kravtsov^{3,4}

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia, Udmurt Republic,
426069 Izhevsk, Studencheskaya str., 7

²Udmurt Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 426067 Izhevsk, st. them. Tatyana Baramzina, 34

³Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620108 Ekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18

⁴Ural Federal University, Russia 620002 Ekaterinburg, Mira str., 19

E-mail: *ludmila396@istu.ru

Thin-sheet rolled low-carbon manganese steel 09G2S with a thickness of 0,8 mm which has strong property anisotropy due to texture and residual stresses, was experimentally studied using SH-wave with horizontal polarization and zero-order symmetric Lamb wave mode. The velocities of elastic wave propagation along the sheet were analyzed as their direction and polarization varied relative to the rolling direction in the range of angles from 0 to 180 degrees. The excitation and reception of normal waves in the sheet were carried out by piezoelectric transducers with dry point contact, providing tangential force application. The results of the research on the anisotropy of acoustic properties, X-ray structural analysis of residual stresses and inverse pole figures, and metallographic studies were obtained.

Keywords: low-carbon manganese steel, anisotropy of properties, velocity of normal waves, residual stresses, X-ray structural analysis.

DOI: 10.31857/S0130308224110021

ВВЕДЕНИЕ

Исследование анизотропии играет важную роль в исследовании, контроле и повышении качества металлов и других материалов. Современные технологии и методы диагностирования позволяют изучать анизотропию с высокой степенью точности, что в перспективе может иметь важное значение в повышении надежности и продолжительности работы различных конструкций и механизмов. Исследования в области анизотропии активно развиваются и отражают многогранность и сложность работы с анизотропными материалами и демонстрируют необходимость постоянной работы над созданием и оптимизацией методов исследования анизотропии.

Изучение анизотропии в материалах играет важную роль в оценке технического состояния конструкций и проведении неразрушающего контроля. Одним из перспективных подходов в исследовании анизотропии является использование специализированного программного обеспечения для моделирования свойств материала. Одним из способов исследования анизотропии является использование программы CIVA, которая позволяет моделировать свойства материалов и проводить виртуальные эксперименты. В работе [1] проведено моделирование возможных изменений скорости акустической волны, исследовано увеличение и уменьшение скорости сдвиговой волны в анизотропной стали.

Зуо [2] предложил метод, сочетающий полуаналитический метод конечных элементов для расчета модальных свойств поверхностных волн, что позволило воспроизвести поведение поверхностных волн в материалах с анизотропными свойствами и предварительным напряжением.

Исследование физических механизмов анизотропии с использованием измерений и моделирования проведено в [3]. Установлено, что зависимость акустической анизотропии и пористости характеризуются с помощью бесконтактной нелинейной реверберационной спектроскопии и моделирования резонансных мод.

Среди технологий и методов, используемых для мониторинга состояния конструкций, представленных в обзоре [4], приведены конструкции преобразователей горизонтально поляризованных сдвиговых волн, включая электромагнитно-акустические преобразователи, и пьезоэлектрические клиновые преобразователи сдвиговых волн, позволяющие проводить более точные измерения и диагностирование анизотропии материалов, в том числе при проведении неразрушающего контроля.

Использование специализированной конструкции электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП), предложенной в [5], позволяет возбуждать две ортогональные поперечные волны в металлических материалах, а также применять ЭМАП для одновременного измерения толщины материала и обнаружения трещиноподобных дефектов. В дальнейшем коллектив исследователей [6] представил новый метод для обнаружения и оценки ориентации трещин в анизотропных материалах, использующий две ортогональные поперечные волны. Проанализировано также распространение и преломление поперечной волны и ее взаимодействие с трещиноподобными дефектами, что позволяет оценивать уровень анизотропии материала с высокой точностью и обнаруживать дефекты на основе полученного эхосигнала.

Работа [7] представляет обзор возможностей использования преобразователей волн Лэмба для систем структурного мониторинга состояния металла и демонстрирует их эффективное применение в эксперименте.

Холлоуэй [8] описал ошибки, которые могут возникать при использовании фазированных решеток для анализа изображений, если предполагается, что анизотропный материал является изотропным, для которого предложен метод количественного определения скорости поперечных волн.

Одним из наиболее эффективных и активно применяемых на практике методов по оценке анизотропии в материалах являются ультразвуковые методы. В целом, они основываются на измерении скорости распространения ультразвуковых волн в различных направлениях объекта. В работе Ивановой [9] рассмотрено применение ультразвуковых методов для оценки анизотропии материалов. Проведен ряд экспериментов для определения параметров анизотропии металлов на основе данных об изменении скорости ультразвуковых волн.

В работе [10] рассмотрены ультразвуковые измерения для определения упругой анизотропии с использованием лазерного возбуждения ультразвука в нержавеющей и мартенситной сталях. Результаты исследований позволили определить скорости волн в разных направлениях в анизотропном материале.

Луо [11] предложил методику определения параметров анизотропии литой крупнозернистой аустенитной нержавеющей стали, основанную на принципах дифракции обратного электронного рассеяния и ультразвукового иммерсионного метода контроля. Этот подход позволил получить двумерные угловые распределения скорости продольной волны и коэффициента затухания в плоскости (010), которые коррелируют с ориентацией столбчатых аустенитных зерен. Этот метод учитывает особенности анизотропии и позволяет более точно определить свойства твердых материалов.

Метод количественного определения анизотропии в стальном волокнистом композите в работе [12] осуществляется с использованием электромагнитных преобразователей и обеспечивает точную оценку свойств ферромагнитных волокон в материалах.

Для изучения анизотропии также возможно осуществлять долгосрочный мониторинг коррозии трубы под воздействием погодных условий, как показано в работе [13], с помощью метода, использующего направленную ультразвуковую волновую томографию для исследования анизотропии и долгосрочного мониторинга материалов и конструкций.

С помощью общего метода инверсии, представленного в [14], демонстрируется высокое разрешение изображений с возможностью расширения диапазона углов прозвучивания с прохождением сигналов, оборачивающихся несколько раз вокруг трубы, прежде чем они достигают приемной решетки.

Однако есть и другие факторы, которые могут существенно повлиять на контроль качества, включая модификации, зазор между преобразователем и объектом исследования, свойства материала и другие эффекты. В связи с этим применение различных методов анализа волновых мод SH0 и SH1 [15] может обеспечить высокую выявляемость дефектов при контроле стальных пластин.

Предложенный метод [16] ультразвуковой томографии для определения модуля Юнга в изотропных пластинах с использованием моды A0, распространяющейся через различные дефекты в пластине, использует карты скорости волн и карты модулей Юнга, которые дают возможность точной оценки среднего модуля по толщине изотропной пластины, что позволяет точно определить области с различной степенью упругости в материале и более точно оценить его анизотропию.

Исследователями активно используются различные методы для анализа и измерения свойств стали и других материалов. Например, исследование [17] с учетом генерации второй гармоники продольной волны и волны Рэлея связывает микроструктурные особенности металлов с параметром акустической нелинейности. Одним из таких методов является использование ультразвуковых волн, в частности их продольных и поперечных комбинаций [18], для измерения плоских напряжений в стальных пластинах. Методика обработки заключается в анализе фазовых спектров эхосигналов, позволяя определить разницу между фазовыми скоростями поперечных и продольных волн.

Использование ультразвуковой фазовой спектроскопии для анализа материалов, изготовленных методом лазерной наплавки, позволяет определить пять независимых упругих констант, описывающих поперечную изотропную упругую анизотропию относительно направления формирования текстуры [19].

Для оценки микроструктурной анизотропии в образце железнодорожного колеса возможно применение метода ультразвукового рассеяния с преобразованием мод [20]. Метод подразумевает разделение всей области сканирования на участки для расчета дисперсии рассеянных сигналов каждого участка.

Новаторский метод взвешенной визуализации для обнаружения трещин в углеродном волокнистом пластике, использующий ультразвуковые волны, представлен в [21]. Процесс использует специальную взвешенную функцию, основанную на измерении времени пролета, с расчетом разницы между эталонным сигналом и сигналом от повреждения.

Тонколистовой прокат приобретает анизотропию свойств вследствие текстуры и остаточных напряжений, для исследований которых широко применяются методы оптического, рентгеноструктурного и аналитического анализа, а также методы неразрушающего контроля [22]. В частности, формирование структуры и механических свойств в прокате различной толщины из низкоуглеродистой стали исследовано в работе [23] с применением оптической и сканирующей электронной микроскопии, позволившие построить ориентационные карты микроструктуры и показать наличие явно выраженной текстуры деформации, соответствующей ориентировкам $\langle 110 \rangle$ вдоль проката.

Анизотропия механических свойств листового проката из углеродистой стали обсуждается также в работе [24], в которой экспериментально установлена неоднородность свойств плоских образцов горячекатаного листа из сплава Ст3, вырезанных в трех направлениях относительно прокатки: вдоль, поперек и под углом 45° .

В работе [25] рассмотрены вопросы, связанные с исследованием текстурного состояния образцов разных партий и разных производителей, изготовленных из стали 10Г2ФБ, с целью построения прямых и обратных полюсных фигур и определения роли текстурообразования в формировании свойств основного металла.

Исследования напряженно-деформированного состояния металла и остаточных напряжений, приведенные в работе [26], обобщают результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений методами рентгеновской дифрактометрии и математического моделирования напряженно-деформированного состояния металла при пластическом формоизменении листовой заготовки.

В работе [27] выявлено, что при операциях гибки листов неизбежно образуются зоны остаточных напряжений, которые по периметру труб распределены неравномерно. В различных зонах неидеального профиля трубы из-за внутреннего давления возникают отличающиеся по уровню кольцевые напряжения. Неравномерность распределения остаточных и эксплуатационных напряжений в совокупности может как ускорять, так и замедлять процесс возникновения и развития дефектов коррозионного растрескивания под напряжением (КРН).

Некоторые работы посвящены исследованию анизотропии свойств в ферромагнитных материалах магнитными методами. В работе [28] исследованы особенности распределения тангенциальной и нормальной компонент магнитных полей рассеяния при полюсном намагничивании листовых материалов — холоднодеформированных конструкционных сталей Ст3, 09Г2С и 08Г2Б, а также электротехнической стали с различной зеренной структурой, в которых прокаткой и одноосным растяжением реализованы разные типы текстур. Установлено, что даже незначительные изменения преимущественной ориентации осей легкого намагничивания (100) существенно влияют на характер распределения величин тангенциальной и нормальной компонент магнитных полей рассеяния. Круговые диаграммы этих параметров деформированных конструкционных сталей имеют вид «восьмерок», примерно перпендикулярных друг другу. Положение максимумов величин компонент магнитных полей на этих диаграммах соответствует положению ближайших к плоскости прокатки проекций осей легкого намагничивания, т.е. тех направлений, вдоль которых железо и его сплавы имеют наименьшую прочность.

В работе [29] представлены результаты экспериментальных исследований кристаллографической текстуры стального листового проката по анизотропии магнитных параметров. Для визуализации магнитных полей рассеяния использовали пленочные магнитоэласты и магнитную суспензию.

Экспериментальные исследования в работе [30] заключались в применении магнитошумового метода для неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов на примере коэффициента нормальной анизотропии листового проката, механических напряжений при упругой деформации электротехнической стали и анизотропии физико-механических свойств ферромагнитных материалов. Так как механическая анизотропия связана с магнитной анизотропией, при ее исследовании использовался магнитный метод на основе эффекта Баркгаузена. Установлено, что упругая деформация в образцах электротехнической стали приводит к резкому изменению уровня магнитного шума и формы круговых диаграмм с учетом знака формируемых в образце напряжений.

Определение остаточных напряжений возможно с использованием рентгеноструктурного анализа по смещению дифракционных пиков отражения от плоскостей кристаллической решетки и акустическим методом на основе эффекта акустоупругости с использованием поперечных и продольных волн [31, 32], поверхностных (рэлеевских) [33] и подповерхностных волн. Скорость рэлеевских и подповерхностных волн имеет анизотропию в листах, изготовленных прокаткой, при этом в направлении, перпендикулярном прокату, скорость рэлеевских и подповерхностных волн возрастает на 1 и 1,5 % соответственно относительно скорости в направлении проката, причем увеличение более выражено в листах меньшей толщины.

Метод определения упругих модулей материалов посредством измерения скоростей продольных и поперечных волн при поверхностном прозвучивании с помощью пары ультразвуковых низкочастотных пьезоэлектрических преобразователей с сухим точечным контактом рассмотрен в работе [34], в которой проводится сравнение результатов экспериментальных измерений модуля Юнга и коэффициента Пуассона с табличными данными для различных стальных образцов.

Методические особенности использования SH-волн и волн Лэмба при оценке анизотропии свойств листового проката рассмотрены в [35]. В работах [4, 18] описаны экспериментальные исследования зависимости скорости нормальных поперечных волн горизонтальной поляризации и волн Лэмба от направления их распространения. Полученные значения скорости можно использовать для определения модулей упругости, а также в качестве самостоятельного информативного параметра оценки упругих свойств материала, например, анизотропии свойств листового проката [8, 36].

В работе [9] экспериментально исследована область со сварными швами. Показано, что скорость распространения SH-волн зависит от угла ввода наклонного преобразователя: при изменении угла ввода с 42,2 до 74,3 град от нормали скорость поперечных волн вдоль сварного шва возрастает с 3074 до 3436 м/с (увеличение на >10 %).

В работе [10] рассмотрено влияние различных методов термической обработки на акустическую анизотропию стальных цилиндров. Цилиндры имеют анизотропию как на поверхности образующей цилиндра (с периодом 180 град), так и на поверхности основания цилиндра (с периодом 90 град).

Исследование образца стали толщиной 1 мм, вырезанного из цилиндрически изогнутого объекта, рассмотрено в [11]. Исследования показывают анизотропию скорости продольных волн и амплитуды их затухания относительно направления изгиба, оба параметра имеют период 90 град.

В работе представлен комплексный подход к анализу анизотропии свойств тонколистового проката, включающий акустические, рентгеноструктурные и металлографические исследова-

ния и позволяющий разделить вклад текстурной анизотропии и остаточных напряжений в акустическую анизотропию.

Цель работы — исследовать зависимости скорости распространения нормальных поперечных волн и волн Лэмба в тонком листовом прокате низкоуглеродистой марганцовистой стали 09Г2С вследствие текстурной анизотропии и остаточных напряжений совместно с рентгеноструктурным анализом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали листы стального проката марки 09Г2С толщиной 0,8 мм размерами 700×700 мм. Для определения условного предела текучести проведены испытания на растяжение плоских образцов, вырезанных из листа в направлении проката и поперек проката. Для оценки текстуры образец шлифа вырезан по направлению проката и исследован с помощью микроскопа Альтами Мет. Микроструктуру оценивали после травления в спиртовом 4%-растворе HNO_3 . Результаты микроструктурного анализа поперечного среза шлифа свидетельствуют о наличии текстуры проката (рис. 1).

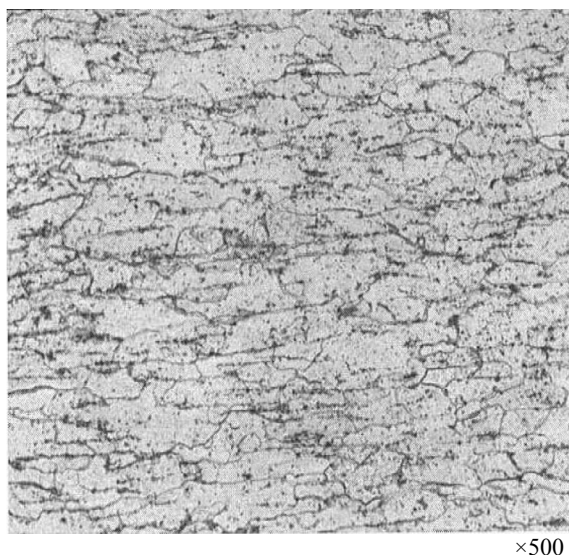


Рис. 1. Текстура проката, поперечный срез вдоль проката.

Измерения с использованием рентгеновского дифрактометра. Текстурные измерения и определение остаточных напряжений выполнены на лабораторном рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 с использованием эйлеровой подвески с тремя степенями свободы. Измерения проводили в геометрии параллельного пучка на излучении $\text{CoK}\alpha$ с длиной волны 0,179 нм. Для формирования параллельного пучка использовали фокусирующую поликапиллярную линзу, обеспечивающую помимо формирования параллельного пучка подавление линии $\text{CoK}\beta$ -излучения и непрерывного спектра. При проведении измерений на вторичном пучке использовался плоскопараллельный коллиматор в комбинации с плоским графитовым монохроматором и точечным детектором.

Экспериментальные полюсные фигуры измерены для рефлексов $\{110\}$, $\{200\}$ и $\{112\}$. Измерения остаточных напряжений производили $\sin^2\Psi$ -методом для рефлекса $\{211\}$ ($2\theta \approx 99,8^\circ$). Обработку (фитирование) дифрактограмм осуществляли с помощью коммерческих программ PANalytical X'Pert Texture и PANalytical X'Pert Stress. Для вычислений остаточных напряжений свойства материала аппроксимировались табличными значениями коэффициента Пуассона (0,293) и модуля Юнга (210 ГПа) для углеродистой стали.

Методика акустических исследований. Для листа стального проката с параметрами: $E = 210$ ГПа, $G = 80$ ГПа, $\rho = 7850$ кг/м³, толщина 0,8 мм, при помощи программного обеспечения «Acoustic Waveguide Tracer» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615397) рассчитаны дисперсионные кривые фазовых и групповых скоростей SH-волн, а также для симметричных S_0 и антисимметричных A_0 мод волн Лэмба в диапазоне частот до 500 кГц (рис. 2).

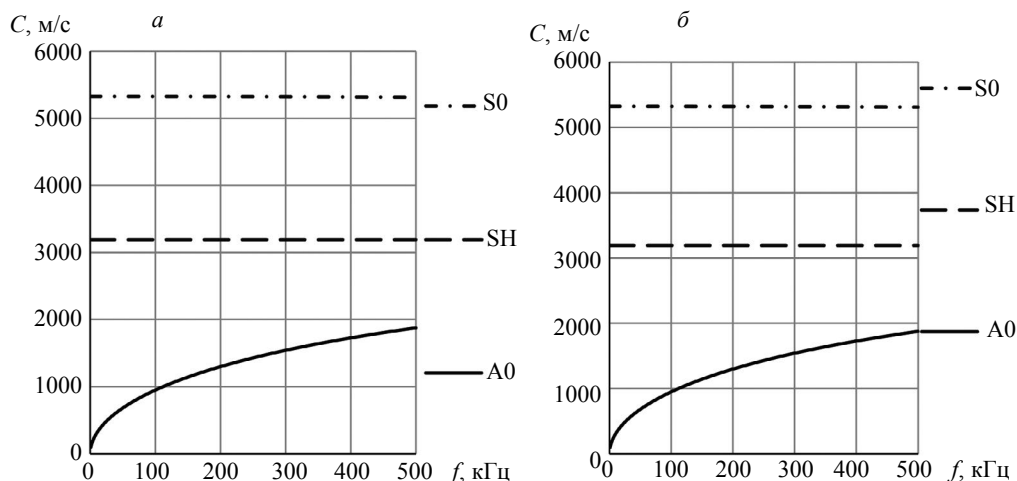


Рис. 2. Дисперсионные кривые фазовой (а) и групповой скоростей (б) для стального листа толщиной 0,8 мм.

Видно, что в указанном диапазоне частот в тонком листе наблюдается возбуждение бездисперсионных SH-волн и симметричной моды S0 волны Лэмба. Скорости указанных мод описываются следующими формулами для скорости SH-волны:

$$C_{S0} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}; \quad (1)$$

$$C_{SH} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2)$$

где C_{S0} — скорость симметричной волны Лэмба; E — модуль Юнга; ρ — плотность; ν — коэффициент Пуассона; C_{SH} — скорость поперечной волны горизонтальной поляризации; G — модуль сдвига.

Для экспериментального возбуждения и регистрации SH-волны и симметричной моды S0 волны Лэмба использованы пьезопреобразователи (ПЭП) с сухим точечным контактом, обеспечивающие передачу колебаний, касательных к поверхности листа (рис. 3б). Изменяя взаимную ориентацию ПЭП, возможно добиться излучения (приема) SH-волны с поляризацией поперек направления распространения либо симметричной моды S0 волны Лэмба с поляризацией вдоль направления распространения. ПЭП подключались в раздельном варианте к низкочастотному дефектоскопу DIO 1000 LF.

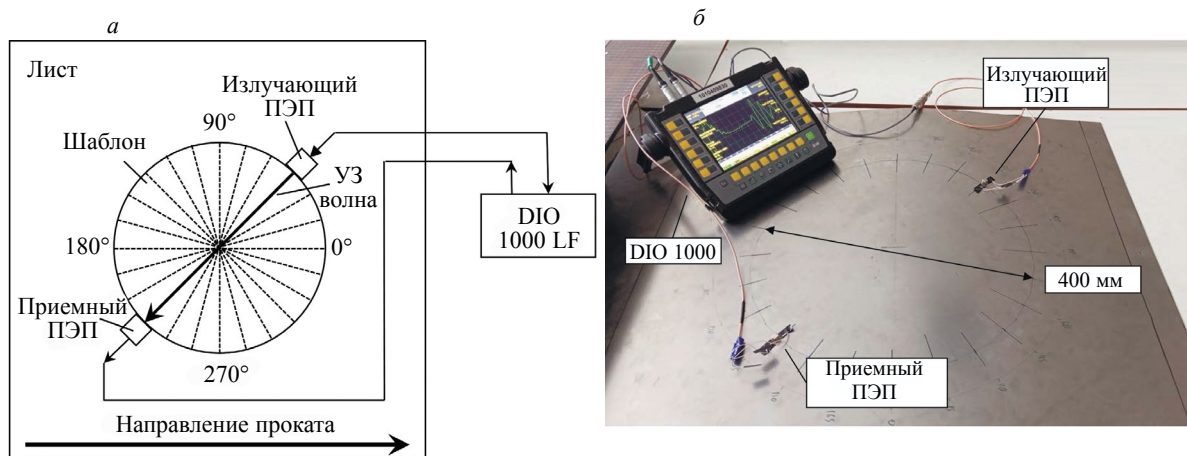


Рис. 3. Схема измерений скоростей волн в зависимости от отклонения направления распространения волны от направления проката (а); фото установки для проведения измерений (б).

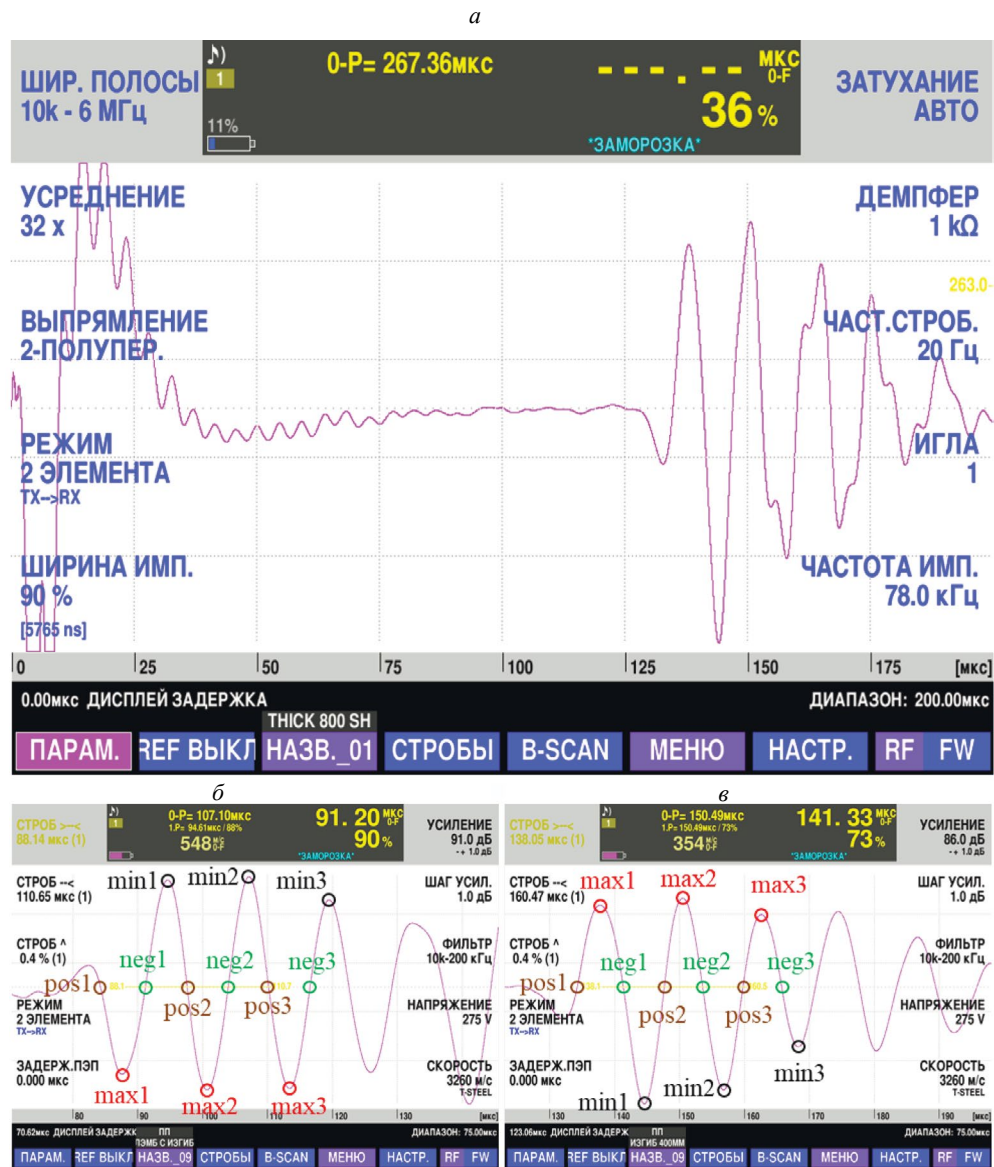


Рис. 4. Эхограмма SH-волны с зондирующим импульсом (а); точки эхограмм волн S0 (б) и SH (в), по которым автоматически обрабатывается время прихода волны (эхограмма волн S0 при автоматической обработке инвертируется).

Схема измерений скоростей волн в зависимости от отклонения направления распространения волны от направления проката представлена на рис. 3а. Преобразователи перемещались по круговому шаблону с шагом, равным 15 град. Вид получаемой эхограммы представлен на рис. 4а и в увеличенном варианте анализируемого импульса — на рис. 4б. Возможность сохранения регистрируемого импульса с частотой дискретизации 200 МГц обеспечивает определение времени с точностью 5 нс. Специально разработанное программное обеспечение с возможностью определения максимальных «max», минимальных «min» и нулевых «neg» значений в нескольких периодах регистрируемого импульса позволило определить точку, имеющую минимальную погрешность в серии многократных измерений (точка «pos2»).

Получаемая при прозвучивании листа эхограмма двух типов волн показана на рис. 4.

Временная задержка в пьезопреобразователе, обусловленная особенностями его конструкции и учетом переноса точки изменений из начала импульса, определена путем измерения времени распространения акустической волны на двух различных базах прозвучивания: $L1 = 200$ мм и $L2 = 400$ мм (см. рис. 3), согласно формуле:

$$t_{\text{пэп}} = \frac{L1 \times t2 - L2 \times t1}{L2 - L1}, \quad (3)$$

где t_1 — среднее время регистрации волны на базе $L1$; t_2 — среднее время регистрации волны на базе $L2$; $t_{\text{ПЭП}}$ — время задержки в ПЭП.

Скорости анализируемых акустических волн C определялись по формуле:

$$C = \frac{L}{\bar{t} - t_{\text{ПЭП}}}, \quad (4)$$

где L — расстояние, пройденное волной ($L = 400$ мм); $\bar{t}$ — среднее время прихода волны.

Ввиду зависимости погрешности измерений от точности установки преобразователей на поверхности листа, измерения проведены по 8 раз, с оценкой среднего значения скоростей и соответствующего доверительного интервала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для SH-волны в направлении проката и в перпендикулярном направлении наблюдается максимальное значение скорости, при этом под углами 45 и 135 град скорость достигает минимального значения (3220 м/с). Индикатриса скорости симметрична относительно направления проката и перпендикуляра к нему. Различие в значениях скоростей в направлении проката и под углом 45 град составляет 120 м/с. Снижение скорости для волны, поляризованной в направлении, перпендикулярном [110], не противоречит данным по объемным волнам в толстых листах [37].

В отличие от SH-волн индикатриса скорости моды S0 волны Лэмба симметрична относительно перпендикуляра к оси проката, имеет минимальные значения в направлении проката, максимальные — в направлении 45 град (поляризация в направлении [110], промежуточные значения — под углом 90 град. Различие в скорости моды S0 волны Лэмба в направлении проката и под углом 45 град составляет 120 м/с (рис. 5а, б).

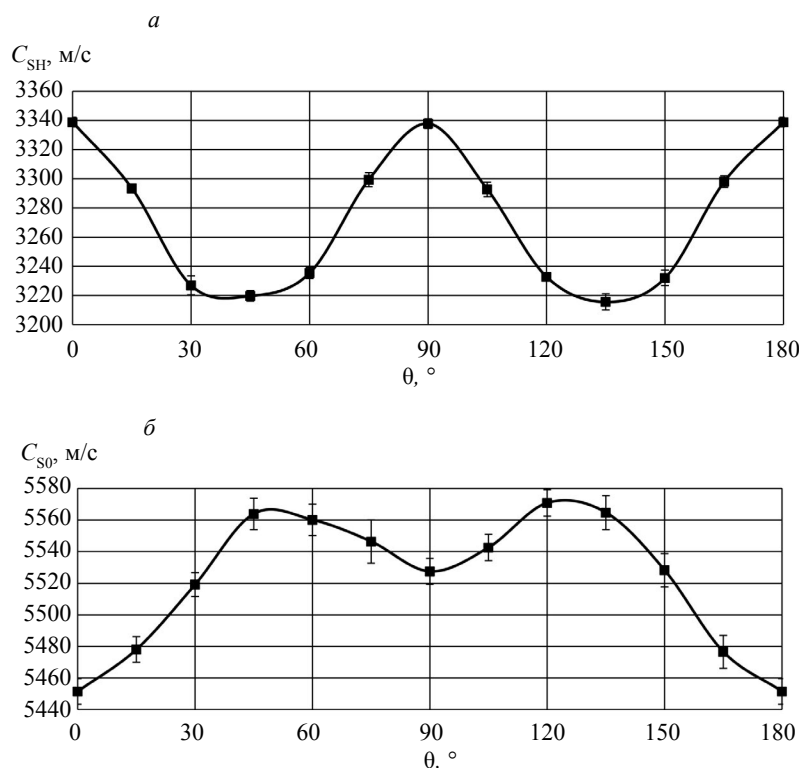


Рис. 5. Анизотропия скорости нормальных SH-волн (а) и волн Лэмба (б). Направление проката — 0 и 180 град.

Расчет коэффициентов анизотропии произведен из условия разницы скоростей волн в направлениях 0 и 90° , являющихся мерой анизотропии свойств листа:

$$R_a(\theta) = 2 \left(\frac{C_{\theta=0} - C(\theta)}{C_{\theta=0} + C(\theta)} \right) \cdot 100 \%, \quad (5)$$

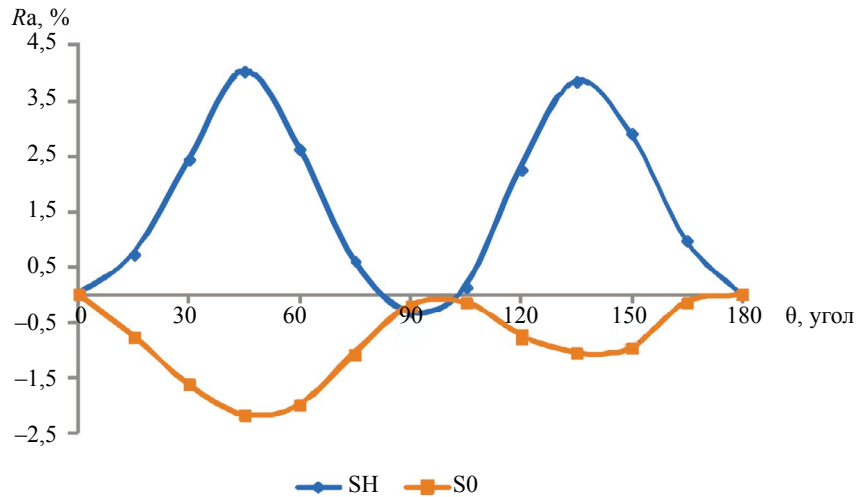


Рис. 6. Акустическая анизотропия свойств в зависимости от направления относительно оси проката.

где $C_{\theta=0}$ — скорость волны в направлении проката; $C(\theta)$ — скорость волны в направлении угла θ .

По результатам полученных скоростей волн вдоль и поперек направления проката рассчитаны нормированный коэффициент анизотропии Ra для SH-волны, равный 4, и нормированный коэффициент анизотропии Ra для волны Лэмба — 2,16 (рис. 6).

Акустическая анизотропия свойств в направлении проката и поперек — минимальна, а в направлении 45° — максимальна.

Решение системы уравнений (1) и (2) относительно упругих модулей E и G и коэффициента Пуассона ν дает следующие выражения для упругих модулей:

$$G = C_{SH}^2 \cdot \rho; \quad (6)$$

$$E = C_{S0}^2 \cdot \rho(1 - \nu)^2; \quad (7)$$

$$\nu = \frac{C_{S0}^2 - 2C_{SH}^2}{C_{S0}^2}. \quad (8)$$

Анизотропия модулей Юнга, сдвига и коэффициента Пуассона, рассчитанные по формулам (6)—(8) с учетом плотности 7800 кг/м^3 , показаны на рис. 7.

С использованием зависимости рис. 7 может быть найдено среднее значение коэффициента поперечной деформации по всей плоскости листа как среднее взвешенное значение коэффициентов в определенном квадранте с учетом веса коэффициента по каждому направлению [37]:

$$\bar{\nu} = \frac{\sum_{\alpha \in l} k_{\alpha} \nu_{\alpha}}{\sum_{\alpha \in l} k_{\alpha}} = \bar{\nu} = \frac{\frac{1}{2} \nu_0 + \nu_{15} + \nu_{30} + \nu_{45} + \nu_{60} + \nu_{75} + \frac{1}{2} \nu_{90}}{6}, \quad (9)$$

где l — это множество всех направлений выбранного разбиения; $\sum_{\alpha \in l} k_{\alpha}$ — общий вес всех весовых коэффициентов для данной плоскости ($k_0 = k_{90} = 1/2$ и $k_{\alpha \neq 0; 90} = 1$); ν_{α} — коэффициенты поперечной деформации, измеренные под углом α к направлению проката.

Расчет для среднего значения коэффициента поперечной деформации по плоскости листа

$$\text{дает значение } \bar{\nu} = \frac{\sum_{\alpha \in l} k_{\alpha} \nu_{\alpha}}{\sum_{\alpha \in l} k_{\alpha}} = 0,23.$$

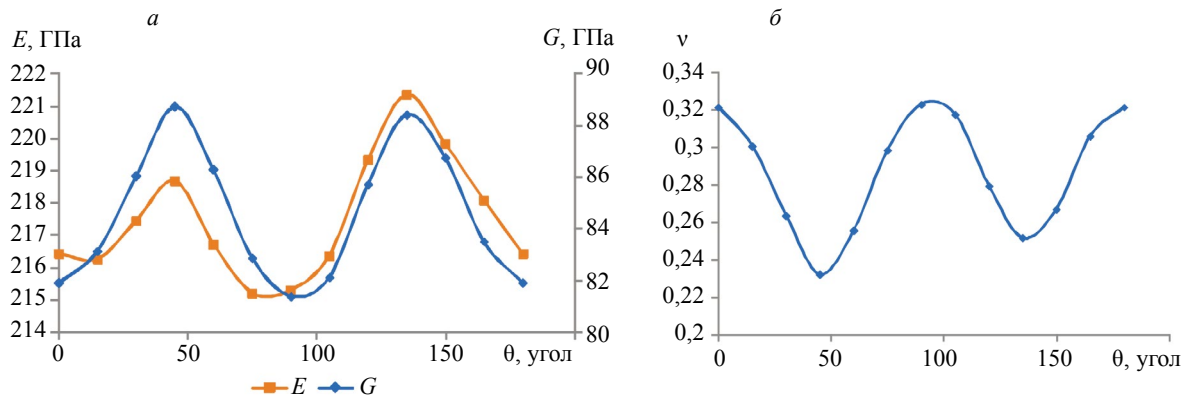


Рис. 7. Анизотропия модуля Юнга и модуля сдвига (а); коэффициента Пуассона (б).

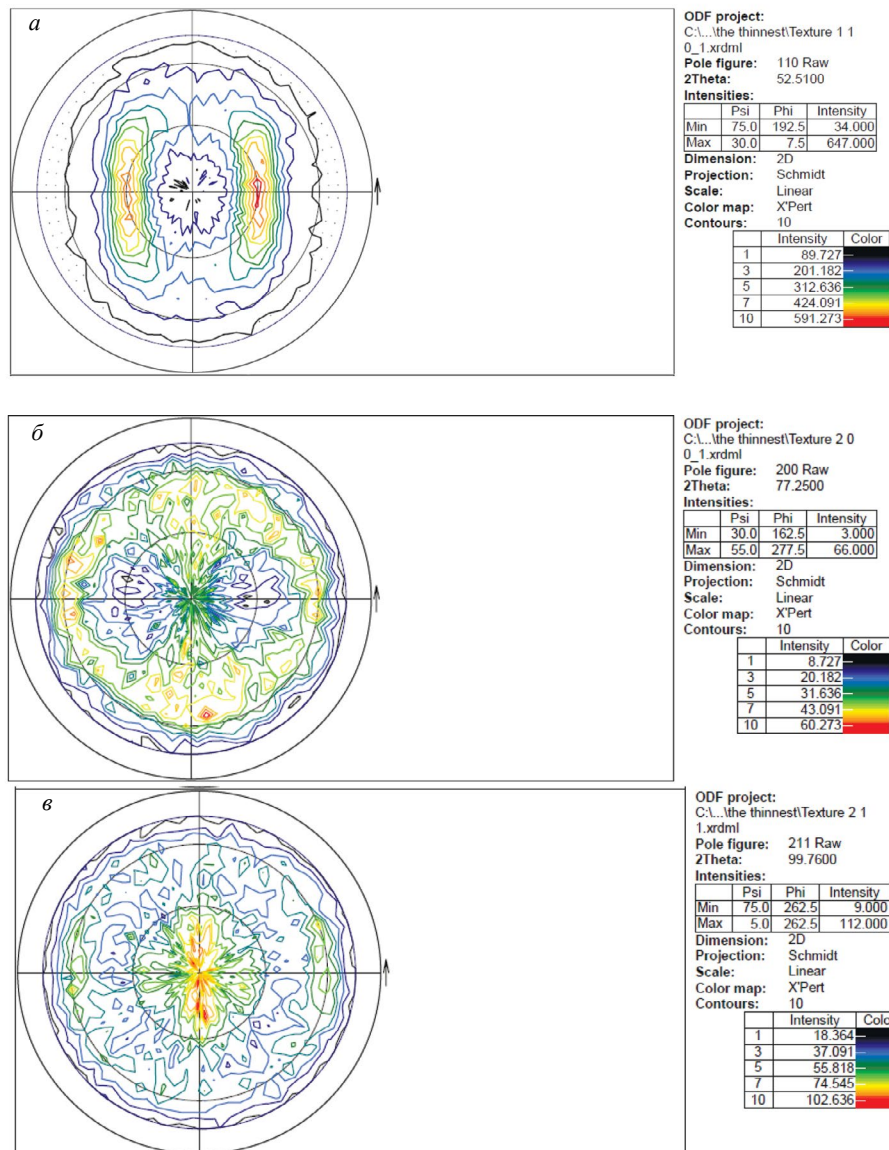


Рис. 8. Полусные фигуры с направлением (110) на углах $2\theta = 52,51$ град (а); на углах $77,25$ град текстура выстраивается по направлению (200) (б); на углах $99,76$ град текстура выстраивается по направлению (211) (в).

Исходя из предположения, что анизотропия механических свойств влияет на величину изменений скорости вследствие текстуры проката, возможно выделение вклада текстуры в акустическую анизотропию следующим образом. Текстурная анизотропия листов после испытаний на

растяжение образцов листа стали оценена по отношению пределов текучести вдоль (337 МПа) и поперек (332 МПа) проката и равна 1,5 %. Тогда акустическая анизотропия (4 %) включает текстурную анизотропию вследствие проката (1,5 %) и анизотропию механических свойств вследствие остаточных напряжений (2,5 %).

Для подтверждения оценки уровня вкладов этих составляющих выполнен анализ текстуры на поперечном срезе шлифа и остаточных напряжений рентгеноструктурным методом.

Рентгеновский текстурный анализ по обратным полюсным фигурам подтверждает наличие текстур, измерения которых представлены на рис. 8.

Видно, что наличие текстуры с преимущественным направлением [110] получено на углах 2θ (52,51 град) с максимальной интенсивностью пика 647 (рис. 8а). На углах 77,25 град текстура выстраивается по направлению [200] с меньшей на порядок интенсивностью пика 66 (рис. 8б). На углах 99,76 град текстура выстраивается по направлению [211] с интенсивностью пика 112 (рис. 8в).

Рентгеноструктурный анализ. На рис. 9 приведена экспериментальная дифрактограмма, измеренная в геометрии $\Theta - 2\Theta$. Для текстурных измерений выбраны рефлекс Fe (110), (200) и (211), для измерения остаточных напряжений — рефлекс Fe (211). Для вычислений остаточных напряжений свойства материала аппроксимировались табличными значениями коэффициента Пуассона (0,293) и модуля Юнга (210 ГПа) для углеродистой стали.

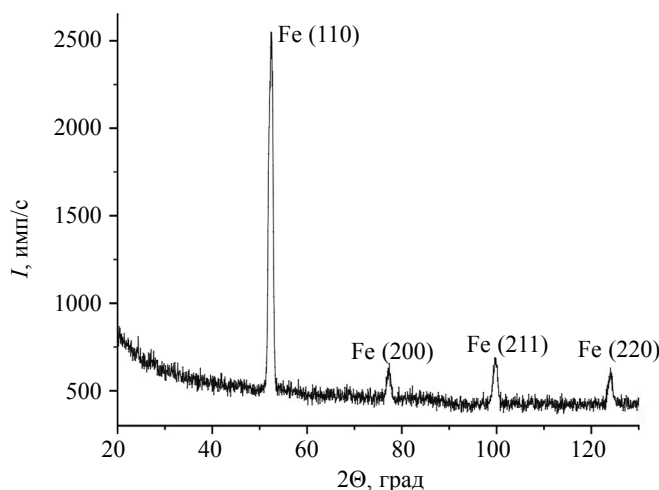


Рис. 9. Экспериментальная дифрактограмма, измеренная в геометрии $\Theta - 2\Theta$.

Рентгеноструктурные результаты измерений ориентационной зависимости остаточных напряжений в тонколистовом образце стали 09Г2С толщиной 0,8 мм получены при четырех различных ориентациях относительно проекции падающего пучка рентгеновского излучения на плоскость образца, обозначаемых как 0, 45, 90 и 135 град (угол отсчитывается от направления прокатки). На рис. 10 приведена зависимость межплоскостного расстояния Fe (211) от $\sin^2\Psi$ в случае, когда проекция падающего рентгеновского пучка направлена вдоль направления прокатки.

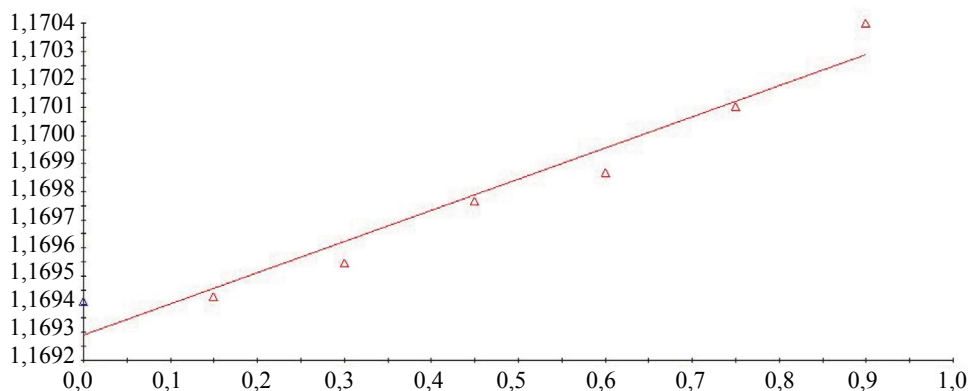


Рис. 10. Зависимость межплоскостного расстояния Fe (211) от $\sin^2\Psi$ в случае, когда проекция падающего рентгеновского пучка направлена вдоль направления прокатки.

Остаточные напряжения при четырех ориентациях пучка

Угол относительно направления проката	Остаточные напряжения, МПа	Погрешность, МПа
0°	154	±15
45°	120	±25
90°	–35	±35
135°	133	±25

В табл. 1 представлены результаты оценки остаточных напряжений рентгеновским методом вдоль четырех направлений относительно направления проката.

Остаточные напряжения в тонколистовом образце стали 09Г2С, оцененные с помощью рентгеноструктурного анализа по смещению брегговских рефлексов, составляют в направлении проката 154 ± 15 МПа, под углами 45 и 135 град составляют соответственно 120 ± 25 МПа и 133 ± 25 МПа. Отмечено практическое отсутствие остаточных напряжений поперек проката -35 ± 35 МПа.

Таким образом, остаточные напряжения 120 МПа по результатам рентгеноструктурного анализа соответствуют вкладу 2,5 % в акустическую анизотропию.

ВЫВОДЫ

Скорость SH-волны достигает максимального значения в направлении проката листа и перпендикулярно ему, при этом под углами 45 и 135 град к направлению проката скорость имеет минимальное значение (3220 м/с). Различие в значениях скоростей составляет 120 м/с. Напротив, скорость моды S0 волны Лэмба имеет минимальные значения в направлении проката (5450 м/с), а максимальные — в направлении 45 град. Разница составляет 120 м/с.

Рассчитаны нормированные коэффициенты анизотропии для SH-волны $R_a = 4$ и для волны Лэмба $R_a = 2,16$. Оценен вклад в акустическую анизотропию (4 %) текстуры (1,5 %) с преимущественным направлением [110], полученной по результатам рентгеноструктурного анализа полюсных фигур, и анизотропии механических свойств вследствие остаточных напряжений (2,5 %).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00252, <https://rscf.ru/project/22-19-00252/> и использованием уникальной научной установки «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. № 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ginzl E. CIVA as an Aid to Understanding Ultrasonic Anisotropy in Steel // e-Journal of Nondestructive Testing. 2024. No. 3 (29). DOI:10.58286/29306
2. Zuo P., Fan Z. Modal properties of elastic surface waves in the presence of material anisotropy and prestress // J. Sound Vib. 2020. V. 485. P. 115588. DOI:10.1016/j.jsv.2020.115588
3. Johnson Ward L., Heyliger Paul R., Benzing, Jake T., Kafka Orion L., Moser Newell H., Harris Derek, Iten Jeremy, Hrabe Nik W. Evidence for contributions of lack-of-fusion defects and dislocations to acoustic nonlinearity and loss in additively manufactured aluminum // NDT E Int. 2024. V. 143. P. 103068. DOI:10.1016/j.ndteint.2024.103068
4. Miao H., Li F. Shear horizontal wave transducers for structural health monitoring and nondestructive testing: A review // Ultrasonics. 2021. V. 114. P. 106355. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106355
5. Parra-Raad J., Khalili P., Cegla F. Shear waves with orthogonal polarisations for thickness measurement and crack detection using EMATs // NDT E Int. 2020. V. 111. P. 102212. DOI:10.1016/j.ndteint.2019.102212
6. Parra-Raad J., Lan B., Cegla F. Orthogonally polarised shear waves for evaluating anisotropy and cracks in metals // NDT E Int. 2021. V. 121. P. 102440. DOI:10.1016/j.ndteint.2021.102440
7. Stepinski T., Mańka M., Martowicz A. Interdigital lamb wave transducers for applications in structural health monitoring // NDT E Int. 2017. V. 86. P. 199—210. DOI:10.1016/j.ndteint.2016.10.007
8. Holloway P., Ginzl E. Calibration for Anisotropic Effects on Shear Wave Velocity for Improvements of Weld Inspections in TMCP Steels // e-Journal of Nondestructive Testing. 2021.
9. Ivanova Y. Application of Ultrasonic Methods for Evaluation the Anisotropy of Materials // The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics. 2023. V. 22. P. 258—267. DOI:10.55549/epstem.1350957

10. Malmström M., Jansson A., Hutchinson B. Application of Laser-Ultrasonics for Evaluating Textures and Anisotropy // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. No. 20. P. 10547. DOI:10.3390/app122010547
11. Luo Zhongbing, Jin Shijie, Zou Longjiang, Zhu Xiaolei, Lin Li. Gain-scale ultrasonic properties measurement of cast austenitic stainless steel // *Measurement*. 2020. V. 151. P. 107231. DOI:10.1016/j.measurement.2019.107231
12. Alabi D.J., Skarlatos A., Riding K.A., Reboud C., Harley J.B. Magnetic anisotropy quantification in steel fiber reinforced materials // *NDT & E International*. 2024. V. 141. P. 102995. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.102995
13. Simonetti F., Alqaradawi M.Y. Guided ultrasonic wave tomography of a pipe bend exposed to environmental conditions: A long-term monitoring experiment // *NDT & E International*. 2019. V. 105. P. 1—10. DOI:10.1016/j.ndteint.2019.04.010
14. Willey C.L., Simonetti F., Nagy P.B., Instanes G. Guided wave tomography of pipes with high-order helical modes // *NDT E Int*. 2014. V. 65. P. 8—21. DOI: 10.1016/j.ndteint.2014.03.010
15. Trushkevych O., Dixon S., Tabatabaeipour M., Potter M.D.G., MacLeod C., Dobie G., Edwards R.S. Calibration-free SH guided wave analysis for screening of wall thickness in steel with varying properties // *NDT & E International*. 2023. V. 135. P. 102789. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.102789
16. Ratassep M., Rao J., Fan Z. Quantitative imaging of Young's modulus in plates using guided wave tomography // *NDT & E International*. 2018. V. 94. P. 22—30. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.09.016
17. Williams C.L., Lear M.H., Shokouhi P. A review of the microstructural contributions to the acoustic nonlinearity parameter measured with longitudinal and Rayleigh wave second harmonic generation in metals // *NDT & E International*. 2024. V. 142. P. 103027. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.103027
18. Wang Yingzhu, Zhu Xupeng, Gong Yunxuan, Liu Nanxi, Li Zuohua, Long Zhili, Teng Jun. Combination of transverse and longitudinal ultrasonic waves for plane stress measurement of steel plates // *Applied Acoustics*. 2022. V. 188. P. 108500. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108500
19. Czink S., Dietrich S., Schulze V. Ultrasonic evaluation of elastic properties in laser powder bed fusion manufactured AlSi10Mg components // *NDT E Int*. 2022. V. 132. P. 102729. DOI:10.1016/j.ndteint.2022.102729
20. Du H., Turner J.A., Hu P. Characterization of microstructural anisotropy in pearlitic steel with mode-converted ultrasonic scattering // *NDT & E International*. 2019. V. 102. P. 189—193. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.11.016
21. Hong Xiaobin, Yue Jikang, Zhang Bin, Liu Yuan. A time-of-flight based weighted imaging method for carbon fiber reinforced plastics crack detection using ultrasound guided waves // *NDT & E International*. 2023. V. 137. P. 102855. DOI:10.1016/j.ndteint.2023.102855
22. Анисимов В.А., Каторгин Б.И., Куценко А.Н., Малахов В.П., Рудаков А.С., Чванов В.К. Неразрушающий контроль / Справочник в 8 томах. Под общей редакцией В.В. Клюева. Т. 4. Кн. 1. 2-е издание, исправленное. М.: Научно-техническое издательство «Машиностроение», 2006. 98 с.
23. Naumenko V.V., Smetanin K.S., Muntin A.V., Baranova O.A., Kovtunov S.V. Features of the formation of structure and mechanical properties in rolled products of various thicknesses from low-carbon microalloyed steel produced by casting and rolling complex // *Izv. Ferr. Metall*. 2021. V. 64. No. 9. P. 669—678. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-9-669-678
24. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V. Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel // *Technical Physics*. 2015. V. 60. No. 5. P. 665—668. DOI: 10.1134/S1063784215050163
25. Grishchenko A.I., Modestov V.S., Polyanskiy V.A., Tretyakov D.A., Shtukin L.V. Experimental investigation of the acoustic anisotropy field in the sample with a stress concentrator // *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2017. No. 3. P. 77—82. DOI: 10.1016/j.spjpm.2017.02.005
26. Коликов А.П., Ту С.О., Сидорова Т.Ю. Экспериментальные и математические методы расчета остаточных напряжений при производстве сварных труб // *Черные металлы*. 2021. № 7. С. 41—49. DOI: 10.17580/chm.2021.07.03
27. Погуляев С.И., Максютин И.В., Попков А.С. Влияние неравномерности распределения остаточных и эксплуатационных напряжений в трубах на возникновение в них дефектов коррозионного растрескивания под напряжением // *Научно-технический сборник: Вести газовой науки*. 2022. № 1(50). С. 120—132.
28. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Худорожкова Ю.В., Корзунин Г.С. Влияние типа кристаллографической текстуры на анизотропию параметров магнитных полей рассеяния стального листового проката // *Физическая мезомеханика*. 2019. Т. 22. № 3. С. 54—64. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-13006
29. Dixon S., Fletcher M.P., Rowlands G. The accuracy of acoustic birefringence shear wave measurements in sheet metal // *J. Appl. Phys*. 2008. V. 104. No. 11. DOI: 10.1063/1.3033395
30. Belyaev Alexander K., Polyanskiy Vladimir A., Semenov Artem S., Tretyakov Dmitry A., Yakovlev Yuriy A. Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // *Procedia Structural Integrity*. 2017. V. 6. P. 201—207.
31. Tretyakov D., Belyaev A., Shaposhnikov N. Acoustic anisotropy and localization of plastic deformation in aluminum alloys // *Mater. Today Proc*. 2020. V. 30. P. 413—416. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.387

32. Roohnia M., Tajdini A., Manouchehri N. Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy // *NDT & E International*. 2011. V. 44. No. 1. P. 13—20. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.09.001
33. Busko V.N., Osipov A.A. Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical Anisotropy of Ferromagnetic Materials // *Devices Methods Meas.* 2019. V. 10. No. 3. P. 281—292. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292
34. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Methodological peculiarities of using SH- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. No. 7. P. 363—369. DOI: 10.1134/S1061830916070056
35. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves // *Steel in Translation*. 2016. V. 46. No. 10. P. 752—756. DOI: 10.3103/S0967091216100077
36. Zou Zhouyiao, Hao Yanpeng, Tian Fangyuan, Zheng Yao, He Weiming, Yang Lin, Li Licheng. An Ultrasonic Longitudinal Through-Transmission Method to Measure the Compressive Internal Stress in Epoxy Composite Specimens of Gas-Insulated Metal-Enclosed Switchgear // *Energies*. 2020. V. 13. No. 5. P. 1248. DOI: 10.3390/en13051248
37. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Zaitsev V.M. On the calculation of mean anisotropy coefficient of sheet materials // *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014. V. 16. No. 4. P. 154—157. DOI: 10.3103/S0967091216100077

REFERENCES

1. Ginzel E. CIVA as an Aid to Understanding Ultrasonic Anisotropy in Steel // *e-Journal of Nondestructive Testing*. 2024. No. 3 (29). DOI:10.58286/29306
2. Zuo P., Fan Z. Modal properties of elastic surface waves in the presence of material anisotropy and prestress // *J. Sound Vib.* 2020. V. 485. P. 115588. DOI:10.1016/j.jsv.2020.115588
3. Johnson Ward L., Heyliger Paul R., Benzing, Jake T., Kafka Orion L., Moser Newell H., Harris Derek, Iten Jeremy, Hrabec Nik W. Evidence for contributions of lack-of-fusion defects and dislocations to acoustic nonlinearity and loss in additively manufactured aluminum // *NDT E Int.* 2024. V. 143. P. 103068. DOI:10.1016/j.ndteint.2024.103068
4. Miao H., Li F. Shear horizontal wave transducers for structural health monitoring and nondestructive testing: A review // *Ultrasonics*. 2021. V. 114. P. 106355. DOI:10.1016/j.ultras.2021.106355
5. Parra-Raad J., Khalili P., Cegla F. Shear waves with orthogonal polarisations for thickness measurement and crack detection using EMATs // *NDT E Int.* 2020. V. 111. P. 102212. DOI:10.1016/j.ndteint.2019.102212
6. Parra-Raad J., Lan B., Cegla F. Orthogonally polarised shear waves for evaluating anisotropy and cracks in metals // *NDT E Int.* 2021. V. 121. P. 102440. DOI:10.1016/j.ndteint.2021.102440
7. Stepinski T., Mańka M., Martowicz A. Interdigital lamb wave transducers for applications in structural health monitoring // *NDT E Int.* 2017. V. 86. P. 199—210. DOI:10.1016/j.ndteint.2016.10.007
8. Holloway P., Ginzel E. Calibration for Anisotropic Effects on Shear Wave Velocity for Improvements of Weld Inspections in TMCP Steels // *e-Journal of Nondestructive Testing*. 2021.
9. Ivanova Y. Application of Ultrasonic Methods for Evaluation the Anisotropy of Materials // *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*. 2023. V. 22. P. 258—267. DOI:10.55549/epstem.1350957
10. Malmström M., Jansson A., Hutchinson B. Application of Laser-Ultrasonics for Evaluating Textures and Anisotropy // *Applied Sciences*. 2022. V. 12. No. 20. P. 10547. DOI:10.3390/app122010547
11. Luo Zhongbing, Jin Shijie, Zou Longjiang, Zhu Xiaolei, Lin Li. Gain-scale ultrasonic properties measurement of cast austenitic stainless steel // *Measurement*. 2020. V. 151. P. 107231. DOI:10.1016/j.measurement.2019.107231
12. Alabi D.J., Skarlatos A., Riding K.A., Reboud C., Harley J.B. Magnetic anisotropy quantification in steel fiber reinforced materials // *NDT & E International*. 2024. V. 141. P. 102995. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.102995
13. Simonetti F., Alqaradawi M.Y. Guided ultrasonic wave tomography of a pipe bend exposed to environmental conditions: A long-term monitoring experiment // *NDT & E International*. 2019. V. 105. P. 1—10. DOI:10.1016/j.ndteint.2019.04.010
14. Willey C.L., Simonetti F., Nagy P.B., Instanes G. Guided wave tomography of pipes with high-order helical modes // *NDT E Int.* 2014. V. 65. P. 8—21. DOI: 10.1016/j.ndteint.2014.03.010
15. Trushkevych O., Dixon S., Tabatabaeipour M., Potter M.D.G., MacLeod C., Dobie G., Edwards R.S. Calibration-free SH guided wave analysis for screening of wall thickness in steel with varying properties // *NDT & E International*. 2023. V. 135. P. 102789. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.102789
16. Ratssepp M., Rao J., Fan Z. Quantitative imaging of Young's modulus in plates using guided wave tomography // *NDT & E International*. 2018. V. 94. P. 22—30. DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.09.016
17. Williams C.L., Lear M.H., Shokouhi P. A review of the microstructural contributions to the acoustic nonlinearity parameter measured with longitudinal and Rayleigh wave second harmonic generation in metals // *NDT & E International*. 2024. V. 142. P. 103027. DOI: 10.1016/j.ndteint.2023.103027

18. Wang Yingzhu, Zhu Xupeng, Gong Yunxuan, Liu Nanxi, Li Zuohua, Long Zhili, Teng Jun. Combination of transverse and longitudinal ultrasonic waves for plane stress measurement of steel plates // *Applied Acoustics*. 2022. V. 188. P. 108500. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108500
19. Czink S., Dietrich S., Schulze V. Ultrasonic evaluation of elastic properties in laser powder bed fusion manufactured AlSi10Mg components // *NDT E Int.* 2022. V. 132. P. 102729. DOI:10.1016/j.ndteint.2022.102729
20. Du H., Turner J.A., Hu P. Characterization of microstructural anisotropy in pearlitic steel with mode-converted ultrasonic scattering // *NDT & E International*. 2019. V. 102. P. 189—193. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.11.016
21. Hong Xiaobin, Yue Jikang, Zhang Bin, Liu Yuan. A time-of-flight based weighted imaging method for carbon fiber reinforced plastics crack detection using ultrasound guided waves // *NDT & E International*. 2023. V. 137. P. 102855. DOI:10.1016/j.ndteint.2023.102855
22. Anisimov V.A., Katorgin B.I., Kutsenko A.N., Malakhov V.P., Rudakov A.S., Chvanov V.K. Directory Non-Destructive Control / Book 1. Acoustic tensometry. Ed. by V.V. Klyuev. 2006. 98 p.
23. Naumenko V.V., Smetanin K.S., Muntin A.V., Baranova O.A., Kovtunov S.V. Features of the formation of structure and mechanical properties in rolled products of various thicknesses from low-carbon microalloyed steel produced by casting and rolling complex // *Izv. Ferr. Metall.* 2021. V. 64. No. 9. P. 669—678. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-9-669-678
24. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V. Relation between the deformation energy and the Poisson ratio during cyclic loading of austenitic steel // *Technical Physics*. 2015. V. 60. No. 5. P. 665—668. DOI: 10.1134/S1063784215050163
25. Grishchenko A.I., Modestov V.S., Polyanskiy V.A., Tretyakov D.A., Shtukin L.V. Experimental investigation of the acoustic anisotropy field in the sample with a stress concentrator // *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2017. No. 3. P. 77—82. DOI: 10.1016/j.spjpm.2017.02.005
26. Kolikov A.P., Ti S.O., Sidorova T.Y. Experimental and mathematical methods for calculation of residual stresses in production of welded pipes // *Chernye Metally*. 2021. No. 7. P. 41—49. DOI: 10.17580/chm.2021.07.03
27. Pogulyaev S.I., Maksyutin I.V., Popkov A.S. Influence of Uneven Distribution of Residual and Operational Stresses in Pipes on the Occurrence of Stress Corrosion Cracking Defects in Them // *Scientific and Technical Collection: News of Gas Science*. 2022. V. 1. No. 50. P. 120—132.
28. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Khudorozhkova Yu.V., Korzunin G. S. Effect of the Crystallographic Texture Type on the Anisotropy of the Magnetic Leakage Field Parameters of Steel Plates // *Physical Mesomechanics*. 2019. V. 22. No. 3. P. 54—64 DOI: 10.24411/1683-805X-2019-13006
29. Dixon S., Fletcher M.P., Rowlands G. The accuracy of acoustic birefringence shear wave measurements in sheet metal // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 104. No. 11. DOI: 10.1063/1.3033395
30. Belyaev Alexander K., Polyanskiy Vladimir A., Semenov Artem S., Tretyakov Dmitry A., Yakovlev Yuriy A. Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // *Procedia Structural Integrity*. 2017. V. 6. P. 201—207.
31. Tretyakov D., Belyaev A., Shaposhnikov N. Acoustic anisotropy and localization of plastic deformation in aluminum alloys // *Mater. Today Proc.* 2020. V. 30. P. 413—416. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.387
32. Roohnia M., Tajdini A., Manouchehri N. Assessing wood in sounding boards considering the ratio of acoustical anisotropy // *NDT & E International*. 2011. V. 44. No. 1. P. 13—20. DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.09.001
33. Busko V.N., Osipov A.A. Application of Magnetic Noise Method to Control the Mechanical Anisotropy of Ferromagnetic Materials // *Devices Methods Meas.* 2019. V. 10. No. 3. P. 281—292. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292
34. Murav'eva O.V., Murav'ev V.V. Methodological peculiarities of using SH- and Lamb waves when assessing the anisotropy of properties of flats // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. V. 52. No. 7. P. 363—369. DOI: 10.1134/S1061830916070056
35. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves // *Steel in Translation*. 2016. V. 46. No. 10. P. 752—756. DOI: 10.3103/S0967091216100077
36. Zou Zhouyiao, Hao Yanpeng, Tian Fangyuan, Zheng Yao, He Weiming, Yang Lin, Li Licheng. An Ultrasonic Longitudinal Through-Transmission Method to Measure the Compressive Internal Stress in Epoxy Composite Specimens of Gas-Insulated Metal-Enclosed Switchgear // *Energies*. 2020. V. 13. No. 5. P. 1248. DOI: 10.3390/en13051248
37. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Zaitsev V.M. On the calculation of mean anisotropy coefficient of sheet materials // *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014. V. 16. No. 4. P. 154—157. DOI: 10.3103/S0967091216100077