

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОДНОВРЕМЕННОГО КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЯ

© 2024 г. Чжао Вэньтун¹, Чжоу Бин^{1,2,*}, Бай Вэньруй¹, Ван Чжаньюн¹

¹Шанхайский технологический институт, Китай, 201418 Шанхай

²ООО «Сучжоу Айсирти Технологджи»

E-mail: *zb521a@sina.com

Поступила в редакцию 24.07.2024; после доработки 03.09.2024

Принята к публикации 16.09.2024

Из-за различий в модах при передаче и приеме ультразвука, а также в сигналах в случае использования метода критически преломленных продольных волн для измерения напряжений в материале и метода распространяющегося перпендикулярно поверхности эхосигнала для измерения толщины, необходимо использовать различные датчики и оборудование при одновременном измерении напряжений и толщины. Сочетая моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в программном пакете Comsol с экспериментальными исследованиями, определялось влияние угла падения зонда, расстояния между зондами и температуры на ультразвуковые волны, а также проанализирована связь между расстоянием между зондами и коэффициентом напряжения измеряемого компонента (K). Предложен новый синхронный ультразвуковой метод определения остаточного напряжения и толщины. В этом методе используется наклонный раздельно-совмещенный преобразователь, а в качестве ультразвуковой волны — критически преломленная продольная волна (КПП-волна) для выявления напряжений и синхронно генерируемые поперечные волны для измерения толщины. Впервые выведена формула для ультразвукового измерения толщины на основе наклонного падения. С помощью самостоятельно разработанного оборудования были проведены эксперименты по ультразвуковому контролю на ступенчатом испытательном блоке и нагруженных консольных балках для проверки точности и достоверности предложенного синхронного метода определения напряжений и толщины. Данный метод имеет значительные перспективы применения в инспекции или онлайн-мониторинге сосудов высокого давления, связанных с усталостными и коррозионными характеристиками.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, контроль напряжений, измерение толщины, конечно-элементное моделирование с помощью программы Comsol, КПП-волна, поперечная волна для измерения толщины, синхронное детектирование напряжений и толщины.

RESEARCH ON ULTRASONIC SYNCHRONOUS DETECTION METHOD FOR MATERIAL RESIDUAL STRESS AND THICKNESS

© 2024 Zhao Wentong¹, Zhou Bing^{1,2,*}, Bai Wenrui¹, Wang Zhanyong¹

¹Shanghai Institute of Technology, China 201418 Shanghai

²Suzhou Aisierti Technology Co., Ltd

E-mail: *zb521a@sina.com

Being limited to the different transmission and reception modes and detection signals of the critical refracted longitudinal wave method for stress measurement and the perpendicular incident echo method for thickness measurement, it is necessary to use different probes and equipments when simultaneously measuring stress and thickness. For this difficulty, the acquisition frequency and the number of bits are taken as the research object to realize the optimization of the echo signal. By combining FEM simulations with Comsol software with experimental research, the effects of probe incidence angle, probe spacing, and temperature on ultrasonic waves are investigated, and the relationship between probe spacing and the stress coefficient of measured component (K) is analyzed. A novel ultrasonic synchronous detection method for residual stress and thickness is proposed. This method is based on an integrated transmit-receive probe with oblique incidence, utilizing critical refracted longitudinal wave (LCR wave) for stress detection and synchronously generated transverse waves for thickness measurement. For the first time, a formula for ultrasonic thickness measurement based on inclined incidence is derived. Using self-developed equipment, ultrasonic testing experiments on step test block and cantilever beam loading device were conducted to verify the accuracy and precision of the proposed synchronous detection method for stress and thickness. This method has significant application prospects in the inspection or online monitoring of pressure vessels concerned with fatigue and corrosion performance.

Keywords: non-destructive testing, stress detection, thickness measurement, FEM simulations with Comsol software, LCR wave, transverse wave for thickness detection, synchronous detection of stress and thickness.

DOI: 10.31857/S0130308224110037

1. ВВЕДЕНИЕ

Сосуды под давлением, нефте- и газопроводы и другие виды конструкций, находящиеся в эксплуатации, могут подвергаться деформациям в результате длительной работы под воздействием различных геологических процессов или других аномальных нагрузок, что

приводит к изменению напряжений и коррозионной деградации, что несет в себе значительные риски при обеспечении безопасности [1]. Для предотвращения подобных инцидентов необходимо регулярно проводить контроль напряжений и толщинометрию эксплуатируемых сосудов высокого давления и нефте- и газопроводов, что является важнейшим методом оценки их безопасности. Ультразвуковой контроль напряжений, известный своей высокой точностью и высокой скоростью сканирования, является широко используемым методом контроля напряжений в эксплуатируемых узлах. Принцип существующих ультразвуковых методов контроля напряжений основан на том, что напряжение определяется по изменению времени распространения критически преломленной продольной волны в фиксированном интервале пространства распространения. Исследователи (как отечественные, так и зарубежные) провели обширные исследования. Zhao Wei [2] использовал ультразвуковые методы для контроля напряжений в стальных изделиях, продемонстрировав высокую эффективность ультразвуковых методов контроля. Chaki [3] предложил метод, сочетающий численный анализ и экспериментальное исследование критически преломленных продольных волн, удостоверившись в точности этого метода для измерения напряжений. Yu Wenguang и др. [4] провели количественный анализ основных влияющих факторов ультразвукового метода измерений напряжений в трубопроводах и разработали более точное ультразвуковое оборудование для измерения напряжений в трубопроводах.

Измерение толщины обычно выполняется с помощью ультразвукового толщиномера по способу перпендикулярного падения, при котором толщина измеряется на основе принципа, согласно которому половина произведения скорости прохождения волны ультразвука на время прохождения равна величине толщины [5]. Однако для некоторых резервуаров для хранения химических продуктов и нефте- и газопроводов для одновременного определения напряжений и измерения толщины требуется различное оборудование и датчики, что делает операцию сложной и трудоемкой. Однако из-за ограничений по частоте платы сбора данных, разрядности оборудования и возможности оптимизации фильтрации алгоритма невозможно решить проблемы смешивания и перекрытия волн, что затрудняет эффективное разделение и точное определение параметров волн. В связи с этим никто не занимался дальнейшей разработкой и анализом преломленных сдвиговых волн, несущих данные о толщине, и не использовал эти волны для измерения толщины.

Основываясь на теории измерения напряжений с помощью критически преломленных продольных волн и измерения толщины с помощью преломленных поперечных волн, в данной работе с помощью МКЭ в программе Comsol построена математическая модель и с помощью разработанного ультразвукового оборудования исследовано влияние частоты регистрации, расстояния между датчиками, угла падения и температуры на распространение волны. Проводится анализ параметров волны и их корректировка при определении гармонических составляющих, а также анализируется и обсуждается преобразование и распространение преломленной сдвиговой волны. Выведена формула измерения толщины на основе наклонного падения волны. Для оценки достоверности высокоточного синхронного метода контроля напряжений и толщины, предложенного в данной статье, были проведены эксперименты по ультразвуковому контролю ступенчатых блоков и нагружаемых консольных балок.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

2.1. Разработка принципиальной схемы и построение модели ультразвуковой комбинированной системы контроля

Из-за изменения показателя преломления в различных средах продольная волна и поперечная волна будут преломляться при падении ультразвукового луча на поверхность исследуемого объекта. Основной принцип ультразвукового метода одновременного определения напряжения и толщины заключается в использовании критической преломленной продольной волны (КПП-волны), которая чувствительна к изменениям напряжения и распространяется вдоль поверхности на определенной глубине, а преломленные поперечные волны используются для измерения толщины. Для определения напряжений время распространения КПП-волны в исследуемой среде и ее количественная связь с напряжением на поверхности могут быть выражены в соответствии с уравнением [6]: $\sigma = K\Delta t = K(t - t_0)$, где K — коэффициент напряжения измеряемой компоненты, МПа/нс; t — время прохождения КПП-волны в среде без напряжений. Принцип измерения толщины основан на преломлении поперечной волны, падающей на изделие и затем отражающейся от нижней части изделия, как показано на рис. 1, в результате чего отраженная поперечная волна несет информацию о толщине. Путем анализа тригонометрических соотношений для пути ультразвукового сигнала

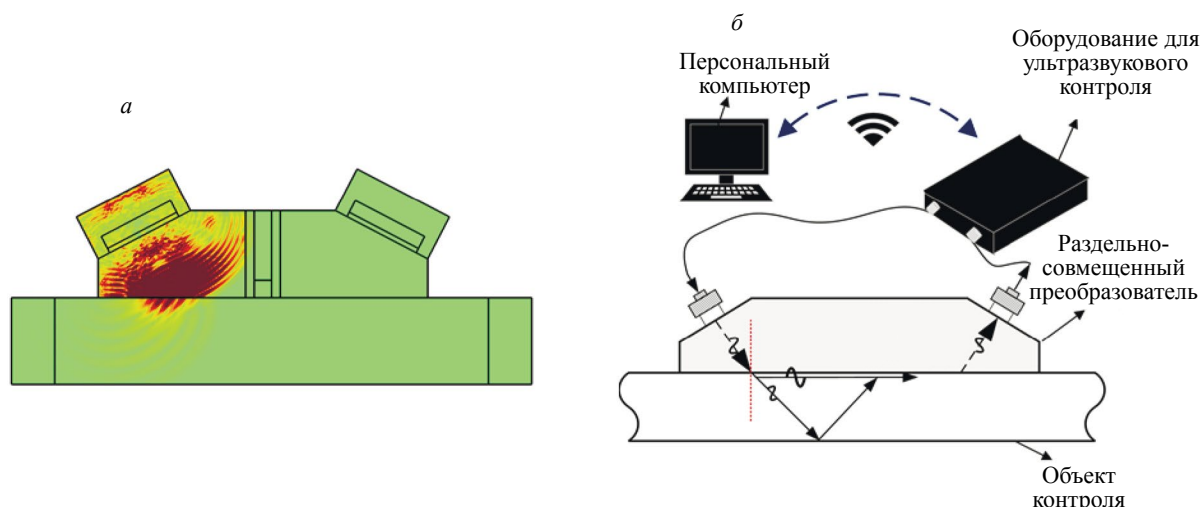


Рис. 1. Модель системы ультразвукового контроля: расчетная модель ультразвуковой системы (а); модель ультразвуковой системы (б).

(сокращенно — траектория звука) и анализа разницы во времени распространения ультразвука (сокращенно — акустической разницы во времени) можно вывести формулу для ультразвуковых измерений толщины при наклонном падении волны. Таким образом, вычисляя акустическую разницу во времени КПП-волн между средой с напряжениями и средой без напряжений, а также акустическую разницу во времени между КПП-волнами и преломленными сдвиговыми волнами при фиксированном напряжении, можно одновременно определить значения напряжений и толщины. В результате применения программного пакета Comsol Multiphysics для моделирования процесса распространения ультразвуковых волн в среде была разработана имитационная модель, представленная на рис. 1а. Пьезопластина в излучающей части преобразователя возбуждает ультразвуковые волны, распространяющиеся в среде, а в приемном преобразователе зонда используется измерительный зонд для приема эхосигналов и построения графика волн эхосигналов. Частота излучения пьезопластины установлена на 5 МГц.

Основываясь на принципах контроля напряжений и измерения толщины с помощью ультразвукового синхронного метода контроля, описанного в данной статье, а также на разработанной расчетной модели, была разработана модель синхронной системы контроля, как показано на рис. 1б. Установка для ультразвукового контроля формирует высокочастотные высоковольтные импульсные токи, которые по кабелям достигают излучающей области преобразователя и возбуждают колебания, создавая ультразвуковые волны. Ультразвуковые волны проникают внутрь заготовки, через определенное время регистрируются приемным преобразователем и по кабелю передаются на установку ультразвукового контроля. Одновременно установка для ультразвукового контроля соединяется с микрокомпьютером через сигналы Wi-Fi, и ряд параметров отображается в программном интерфейсе установки на компьютере.

2.2. Оборудование для измерений, материалы и методы

В соответствии со схемой модели ультразвуковой испытательной системы было самостоятельно разработано тестирующее оборудование, показанное на рис. 2а. Его аппаратная система включает в себя разделяюще-совмещенный ультразвуковой преобразователь, отдельный ультразвуковой преобразователь, контур передачи ультразвука, контур приема ультразвука и т.д. Программное обеспечение включает в себя модули сбора сигнала, определения параметров сигнала, решения задачи по определению напряжений, калибровку и калибровочные модули. Благодаря интеграции программных и аппаратных систем получается портативное оборудование ультразвуковой системы контроля напряжений и измерения толщины, как показано на рис. 2, что соответствует требованиям национального стандарта GBT 32073-2015 «Non-destructive testing residual stress ultrasonic critical refraction longitudinal wave detection method» (неразрушающий контроль остаточных напряжений ультразвуковым методом контроля критически преломленными продольными волнами). В то же время это устройство может быть подключено к портативному компьютеру для выполнения ряда операций по визуальной обработке. Принцип работы этого устройства основан на вышеупомянутом методе по контролю оста-



Рис. 2. Экспериментальное оборудование.

точных напряжений и измерению толщины. Разрешение аппаратной акустической разницы во времени составляет 0,5 нс, а разрешение погрешности повторной регистрации напряжений неподвижного датчика может достигать ± 1 МПа, а разрешение подвижного датчика — ± 5 МПа. Образцы нагруженных консольных балок и стальных прутков и образцы для ультразвуковой толщинометрии, используемые в эксперименте, изготовлены из низкоуглеродистой стали Q235, а толщина рычага балки составляет 5 мм. Размеры образца стального прутка составляют 90×25 мм, а толщина — 5 мм. Толщины четырех ступеней ультразвукового блока для измерения толщины составляет 3, 5, 8, 10 мм, а размер каждой ступени — 60×60 мм.

Целью данной работы является изучение факторов, влияющих на ультразвуковые эхосигналы, проведение работ по обеспечению оптимальных условий для прохождения волн и выведение формулы одновременного измерения толщины на основе наклонного падения волны, а также экспериментальная оценка точности синхронного метода определения напряжения и толщины. Прежде всего был рассчитан первый критический угол около $27,8^\circ$ по скорости звука продольной волны (5790 м/с) и скорости звука поперечной волны (3100 м/с) в стали Q235 и по скорости звука продольной волны (2700 м/с) в органическом стекле, что послужило основой для выбора угла для последующих экспериментов. Для обеспечения достоверности экспериментальных данных в ультразвуковых датчиках равномерно используется кристаллический осциллятор частотой 5 МГц. Во-вторых, с помощью самостоятельно разработанного оборудования для ультразвукового контроля напряжений была проведена оптимизация системы путем изучения частоты сбора данных с платы и оптимизации алгоритма. Затем ультразвуковые датчики с различным расстоянием между ними (1,5; 2; 3; 4 и 5 см) были использованы для моделирования и эксперимента, волновые данные были записаны и проанализированы для оценки влияния расстояния между датчиками на значение K и пространственное разрешение датчика. Расстояние между датчиками обозначается как L , что означает расстояние между центральной точкой органического стекла на передающем ультразвуковом преобразователе и центральной точкой органического стекла на приемном преобразователе. Это также расстояние между центральной точкой падения ультразвуковой волны на поверхность заготовки и центральной точкой выхода ультразвуковой волны, отраженной от поверхности заготовки, как показано на рис. 1б. Первый критический угол $27,8^\circ$ известен, а углы падения ($24, 27, 29^\circ$) заданы для моделирования и эксперимента, чтобы наблюдать влияние угла на количество гармонических волновых сигналов. В то же время различные температуры (1, 11, 21, 31, 41, 51°C) были установлены для моделирования и эксперимента, чтобы проанализировать влияние температуры на результаты ультразвукового контроля. В ходе эксперимента для обеспечения полного контакта датчика с образцом каждый раз наносится одинаковое количество смазывающей жидкости, а перед началом контроля производится многократное перемещение датчика вперед и назад для создания постоянного контактного сопротивления. Наконец, на основе выведенной формулы ультразвукового измерения толщины при наклонном падении, в сочетании с оптимизированной системой обнаружения, были проведены эксперименты по ультразвуковому тестированию на блоке со ступеньками для измерения толщины и на нагруженной балке. Эксперименты проводились в строгом соответствии со стандартными технологическими процедурами, чтобы обеспечить получение высококачественных результатов ультразвукового контроля. Эти экспериментальные методы комплексно рассматривают ключевые технические моменты ультразвукового контроля и являются важным экспериментальным обоснованием и

теоретическим руководством для использования одновременного измерения напряжений и толщины с помощью ультразвукового контроля в машиностроении.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ

3.1. Анализ ультразвуковых эхосигналов

Моделирование МКЭ в программе Comsol для изучения условий распространения ультразвука. Процесс распространения ультразвука в среде моделируется с помощью конечно-элементного программного обеспечения Comsol Multiphysics, модель состояния ультразвуковых волн внутри заготовки в определенный момент показана на рис. 3. Излучающий пьезоэлемент преобразователя возбуждает ультразвуковые волны, распространяющиеся в среде. После того как продольные волны наклонно проходят через клиновидную призму преобразователя, внутри заготовки генерируются различные формы ультразвуковых волн (преломленные продольные волны, преломленные поперечные волны). КПП-волна, используемая для контроля напряжений, представляет собой особую преломленную продольную волну. Глубина проникновения КПП-волны определяет объем области контроля напряжений. На рис. 3 видно, что КПП-волна распространяется вдоль поверхности на глубине около 1,3 мм, а преломленные поперечные и продольные волны распространяются в направлении нижней поверхности заготовки. При этом преломленные поперечные волны имеют более высокую интенсивность, преломленные продольные волны — более низкую, а КПП-волны — самую низкую. Исследования показали, что зависимость глубины распространения (D) КПП-волн от частоты (f) ультразвукового преобразователя и скорости (V) ультразвуковых волн имеет вид $D = Vf^{-0,96}$ [7]. Единица измерения D — мм, единица измерения V — км/с, а единица измерения f — МГц. Подставим в формулу значения скорости ультразвука и частоты ультразвукового преобразователя. Полученное значение глубины D составляет 1,23 мм, что в целом соответствует результатам моделирования. Это также указывает на то, что напряжения, определяемые при помощи ультразвука, являются усредненными напряжениями в пределах 1 мм от глубины поверхности. Исходя из пути распространения волны, можно понять, что при большой толщине заготовки сигнал, отраженный от нижней поверхности преломленной продольной волной, выходит за пределы диапазона приемного преобразователя, поэтому сигнал отраженной преломленной продольной волны не будет наблюдаться.

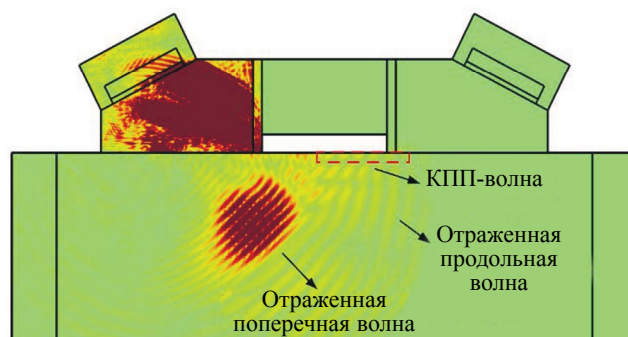


Рис. 3. Диаграмма смоделированного состояния ультразвуковой волны внутри заготовки в конкретный момент времени.

Настройка ультразвуковых эхосигналов. Точность ультразвукового контроля напряжений в изделиях тесно связана с точностью и стабильностью данных акустической разницы во времени КПП-волн. Минимальное разрешение и стабильность данных акустической разницы во времени в основном определяются частотой, битовой глубиной и возможностями оптимизации фильтрации для платы регистрации ультразвуковых сигналов. На рис. 4 показаны ультразвуковые эхосигналы, зарегистрированные различными ультразвуковыми устройствами контроля напряжений. На рис. 4а, б показаны ультразвуковые эхосигналы от He Jingbo [8] и Hou Huaishu [9] соответственно. Очевидно, что их ультразвуковое оборудование имеет низкую частоту регистрации и глубину битов, плохую стабильность волны и низкое минимальное разрешение акустической разницы во времени. Существует проблема, что эффект безэхового поглощения не очень благоприятен, что приводит к большому количеству циклов ультразвукового

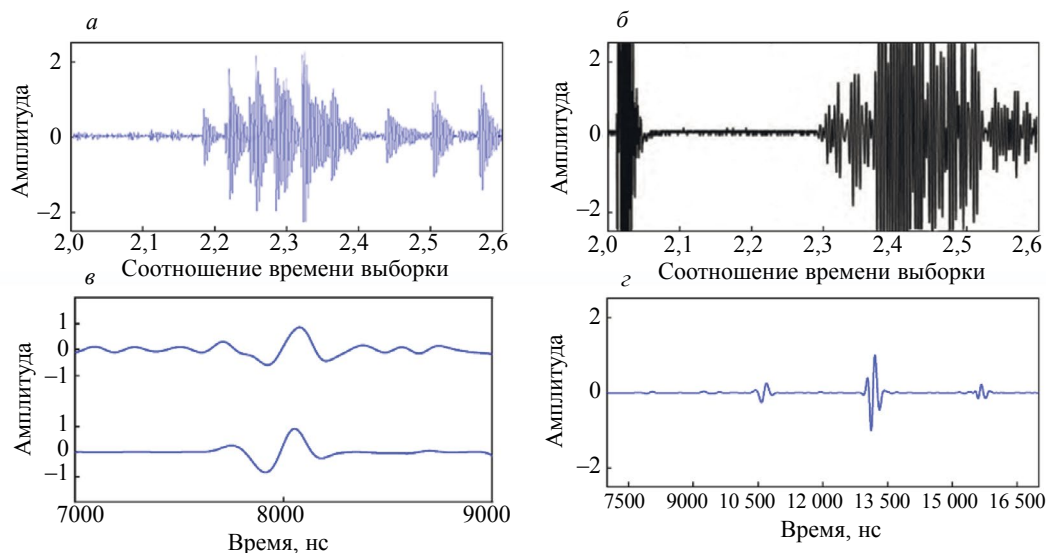


Рис. 4. Оптимизированные данные экспериментальных исследований ультразвукового экосигнала: волна при контроле блока CSK-1A ультразвуковым методом (а); волна при контроле блока SCK-1B ультразвуковым методом (б); КПП-волна на оборудовании самостоятельной разработки с разными высокоточными платами сбора данных (в); волна после оптимизации разрабатываемым оборудованием (г).

экосигнала. В данной работе проанализированы ультразвуковые экосигналы с различными частотами с помощью самостоятельно разработанного ультразвукового оборудования для контроля напряжений. Как показано на рис. 4в, в случае волн, полученных с помощью плат регистрации ультразвука с частотой 100 МГц и 2 ГГц, минимальное разрешение акустической разницы во времени уменьшается с 10 до 0,5 нс с увеличением частоты регистрации и может быть еще больше уменьшено до 0,2 нс путем оптимизации программного обеспечения. Количество эффективных точек сбора данных значительно увеличивается, что предотвращает подавление сигналов шумом. В то же время разрядность дискретизации АЦП-платы регистрации ультразвуковых сигналов высока, и без большого усиления может быть четко отображена гладкая волна, как показано на рис. 4г, что позволяет избежать искажения волны и усечения пиков. Кроме того, конструкция ультразвукового преобразователя с высоким демпфированием позволяет волне ультразвукового сигнала затухать в течение полутора циклов, избегая запаздывания, что очень значимо для точного позиционирования и анализа волны.

Влияние расстояния между преобразователями на экосигнал. Точность ультразвуковых измерений напряжений зависит от акустической разности времен КПП-волн, измеренных в состоянии с нулевым напряжением в качестве эталона, и коэффициента напряжения измеряемой компоненты K . Состояние с нулевым напряжением может быть достигнуто путем проведения процедуры отжига образца, что позволяет измерять разность времен КПП-волн в различных напряженных состояниях. Значение K может быть определено в ходе калибровочных экспериментов. Было замечено, что различные ученые оценивали коэффициент K со значительными вариациями в диапазоне от 1,0 [10] до 16,1 [11], что приводит к плохой согласованности данных. Guo Moqiao [11] измерил значение K для преобразователей с разным расстоянием между ними при исследовании влияния факторов контроля напряжений методом критической преломленной продольной волны, но не исследовал соответствующую взаимосвязь. Кроме того, при работе на низких частотах платы сбора данных увеличение расстояния между датчиками приводит к уменьшению амплитуды затухания ультразвука, снижению пространственного разрешения датчика [13], увеличению сопутствующих помех, а также влияет на точность и стабильность контроля.

В данной работе с помощью программы Comsol была смоделирована ультразвуковая волна при использовании преобразователей с различными расстояниями между ними (20, 25, 30, 35, 40, 45 мм), что послужило руководством для проектирования датчика, используемого в поисковом эксперименте. На рис. 5а показана волна, определенная путем моделирования на различных расстояниях между датчиками. С увеличением расстояния экосигнал ультразвуковых волн постепенно затухает. Экосигнал продольной волны после одного отражения постепенно уменьшается, когда интервал превышает 3 см, и искажение волны ослабевает. Поэтому для анализа экосигнала и калиброванного значения K с помощью механической обработки были

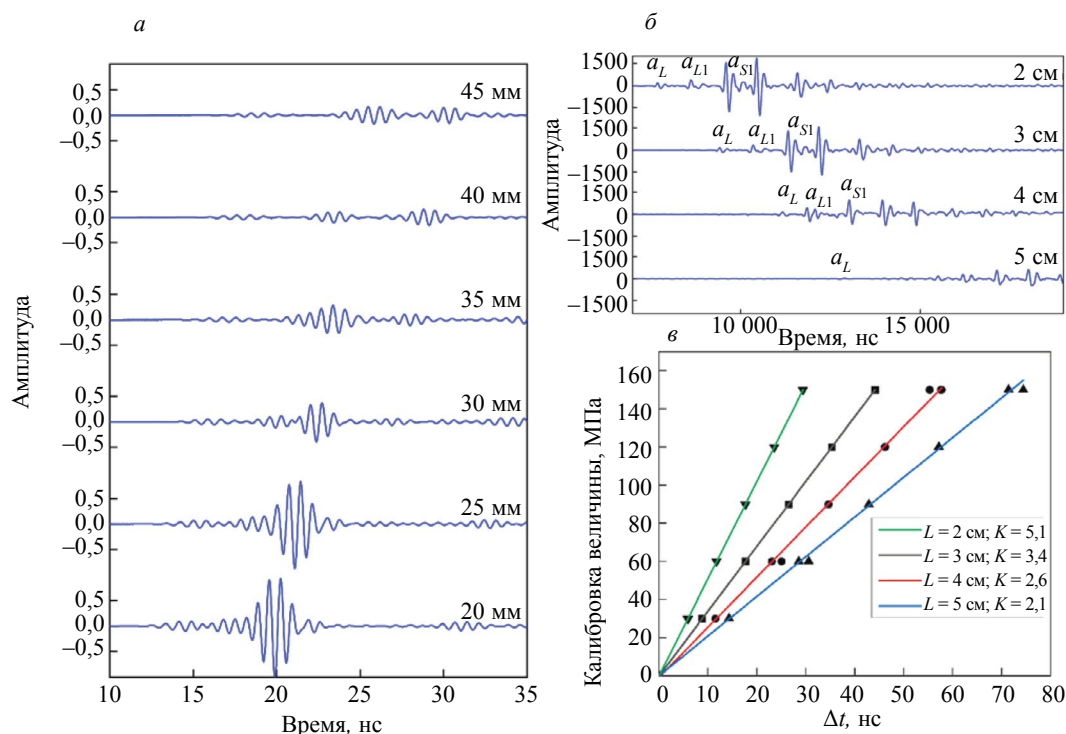


Рис. 5. Экспериментальные данные о влиянии расстояния между датчиками на экосигнал: моделирование волны с разным расстоянием между датчиками (а); волна, регистрируемая при различных расстояниях между зондами (б); калибровка величины K с помощью аппроксимированной кривой (в).

разработаны датчики с переменным расстоянием между ними (2, 3, 4, 5 см). На рис. 5б показана волна, полученная при различных расстояниях между зондами. Видно, что увеличение расстояния между зондами значительно уменьшает интенсивность ультразвукового экосигнала, что согласуется с данными, полученными при моделировании. Можно заметить, что при расстояниях между датчиками 2, 3 и 4 см все обнаруженные моды волн имеют вид КПП-волны a_L , преломленной продольной волны a_{L1} и преломленной поперечной волны a_{S1} . Однако, когда расстояние между датчиками достигает 5 см, волна испытывает значительное затухание, что затрудняет различение мод волн, следующих за КПП-волной. Благодаря высокоточному ультразвуковому оборудованию количество помех не увеличивается, а общее качество волны улучшается. На рис. 5в показана калибровочная кривая коэффициента K , построенная в ходе эксперимента по калибровке значения K с помощью датчиков с различным расстоянием между ними. Для одного и того же материала значение K постепенно уменьшается с увеличением расстояния между датчиками, и существует отрицательная корреляция.

Согласно теории акустической упругости, существует зависимость между значением K и упругой постоянной материала, скоростью распространения ультразвука и расстоянием между датчиками, как показано в уравнении (1) [14]; λ и μ — модули упругости Ламе; l , m , n — константы Мурнагана, они могут рассматриваться при фиксированных значениях констант для конкретного материала; L — расстояние между излучающим и приемным датчиком; V_0 — скорость продольной волны в условиях отсутствия напряжений; K в основном связан с V_0 и L , а напряжения оказывают незначительное влияние на величину скорости распространения ультразвука; V_0 можно рассматривать как константу, и уравнение (1) упрощается до $K = \omega_0 \frac{1}{L}$.

Коэффициент напряжения измеряемой компоненты K обратно пропорционален расстоянию между зондами L . Для одного и того же материала ω_0 — постоянный коэффициент, единица измерения — МПа·м/нс, который может быть принят равным 0,104 МПа·м/нс для образцов из стали Q235. Датчики с определенными значениями K могут быть разработаны в соответствии с расстоянием между датчиками L и ω_0 , и тогда значение K можно рассматривать и изучать в том же диапазоне. С одной стороны, он имеет решающее значение для проектирования ультразвуковых датчиков напряжений с различным расстоянием между датчиками, а с другой стороны, он имеет определенное значение для некоторых малопроизводительных ультразвуковых

приборов для получения лучших ультразвуковых эхосигналов путем изменения расстояния между датчиками для проектирования ультразвуковых датчиков:

$$K = \frac{-2V_0(3\lambda + 2\mu)}{\left(\frac{4\lambda + 10\mu + 4m}{\mu} + \frac{2l - 3\lambda - 10\mu - 4m}{\lambda + 2\mu}\right)L}. \quad (1)$$

Влияние угла наклона датчика на эхосигнал. Преломленная волна в ультразвуковом методе контроля напряжений несет в себе данные о толщине в виде эхосигнала, отраженного от дна заготовки, что может быть использовано для совместного измерения толщины. Однако из-за проблемы смещения и наложения волн никто из ученых не занимался дальнейшей разработкой и анализом волны следующих после критически преломленной продольной волны ультразвукового эхосигнала, а также не использовал соответствующие волны для измерения толщины. Во-первых, синхронный ультразвуковой метод контроля напряжений и толщины должен эффективно разделять и различать ультразвуковые эхосигналы. Согласно закону Снеллиуса, изменения ультразвукового эхосигнала в основном определяются углом падения падающей волны и направлением главного лепестка давления преломляющейся волны, как показано на рис. 6а.

На рис. 6б показана волна, полученная при моделировании датчика с различными углами падения (24, 27, 29°). С увеличением угла первая и вторая волны постепенно ослабевают, в то время как интенсивность третьей волны остается примерно неизменной, и в целом волна движется вперед. Первая волна a_L — это эхосигнал от КПП-волны, вторая волна a_{L1} — эхосигнал от продольной волны, падающей на дно, а третья волна a_{S1} — эхосигнал от поперечной волны, падающей на дно. В имитационной модели угол наклона пьезоэлектрической пластины определяет угол падения ультразвуковой волны. Между тем, с увеличением угла расстояние распространения волны внутри заготовки уменьшается, что приводит к общему смещению волны вперед, поэтому в результате моделирования ультразвуковой эхосигнал получается более четким.

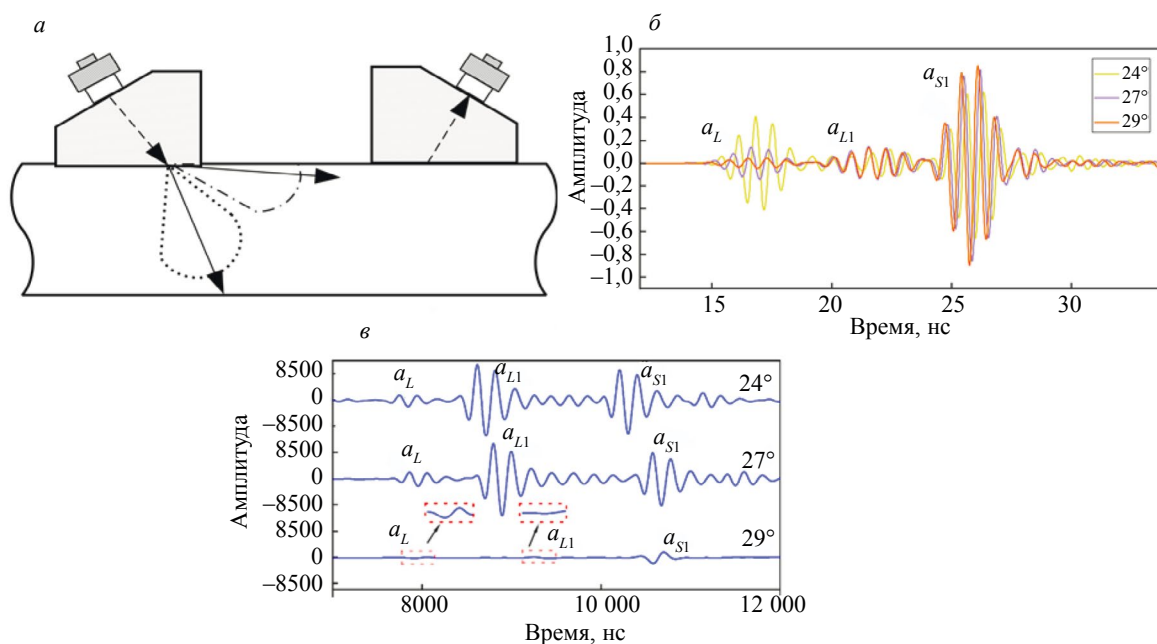


Рис. 6. Экспериментальные данные о влиянии угла падения датчика на эхосигнал: схематическая диаграмма огибающей распространения ультразвука (а); волна, полученная с помощью моделирования для различных углов падения зонда (б); волна, зарегистрированная датчиком под разными углами падения (в).

На рис. 6в показана волна, регистрируемая датчиком под разными углами падения (24, 27, 29°). Волны, зарегистрированные под тремя разными углами падения, все имеют признаки

присутствия волны a_L , что связано с перемещением угла расхождения пьезоэлектрической пластины при возбуждении ультразвуковой волны [15]. С точки зрения излучения акустической волны, когда угол падения меньше или равен первому критическому углу преломления, главный лепесток излучаемой энергии преломленной продольной волны попадает внутрь заготовки, что приводит к появлению сильных волн a_L и a_{L1} . Когда угол падения немного больше первого критического угла преломления, излучаемая энергия главного лепестка преломленной продольной волны уже прошла наружу, оставив только небольшую часть продольной волны, распространяющейся на определенной глубине вдоль верхней поверхности, при этом волна a_L все еще присутствует, а волна a_{L1} почти отсутствует. В этот момент происходит отражение внутрь образца только энергии главного лепестка преломленной сдвиговой волны, и в итоге a_{S1} оказывается зафиксированной. Таким образом, на основе анализа эхосигналов можно сделать вывод, что в случае преобразователя с углом падения 29° эффективно снижается интерференция отраженных преломленных продольных волн и преломленных сдвиговых волн, обеспечивая точное регистрирование преломленной сдвиговой волны. Когда угол падения составляет 27° , КПП-волна относительно интенсивная и может быть использована для контроля напряжений; однако при контроле тонких заготовок волна a_L имеет тенденцию перекрываться волной a_{L1} , что затрудняет установление точного положения. В случае более толстых заготовок волна a_{L1} претерпевает значительное затухание и волновые изменения, что приводит к плохой устойчивости результатов. При угле падения 29° энергия главного лепестка преломленной продольной волны преломляется наружу, что приводит к затуханию волн a_L и a_{L1} , в то время, как волна a_{S1} остается стабильной. Поэтому отраженная часть преломленной сдвиговой волны используется в качестве сигнала для определения толщины изделия.

Влияние температуры на контроль дефектов. Погрешность измерений в ультразвуковом методе контроля напряжений зависит от температурного воздействия. Точность метода контроля напряжений зависит от скорости распространения продольных волн, траектории прохождения звука и внутренней структуры заготовки, на которые также влияют изменения температуры. Jia и др. [16] установили, что напряжения и температура влияют на продольные ультразвуковые волны, и заметили, что скорость волны линейно изменяется в зависимости от напряжений и температуры. Pan Qinxue и др. [17] проанализировали влияние температуры на коэффициент распознавания и изменение времени распространения ультразвука, обнаружив, что изменения температуры значительно влияют на акустическую разницу во времени. Niu Xiaochuan и др. [18] предположили, что температура влияет на выявление напряжений в бесшовных стальных рельсах, и был сформулирован вывод о нелинейном влиянии температуры на распространение ультразвуковых продольных волн в металлах. Zhang Yucong [19] на основании исследований осевых напряжений в стальных деталях подтвердил, что температурный эффект в первую очередь влияет на скорость ультразвука, что приводит к ошибкам в определениях напряжений. Поэтому влияние температурных эффектов необходимо учитывать при ультразвуковом контроле напряжений. Однако в существующей литературе нет комплексных исследований, объединяющих теоретические расчеты, моделирование и экспериментальный анализ для изучения влияния температурных эффектов на погрешности ультразвукового контроля напряжений. В данной работе проводится сравнительный анализ взаимосвязи между температурными эффектами и ошибками контроля напряжений с трех точек зрения: теоретических расчетов, моделирования и экспериментального анализа, с целью уменьшения влияния температуры на процесс контроля напряжений и повышения точности.

На рис. 7а показана схема компенсации температуры в раздельно-совмещенном преобразователе. Тепловое расширение и сжатие, вызванные изменением температуры, влияют на звуковой тракт КПП-волны. Если задать разницу температур как ΔT , α_1 и α_2 — коэффициенты теплового расширения неподвижной пластины зонда и пьезоэлектрической пластины соответственно, то звуковой тракт КПП-волны L_1 будет равен:

$$L_1 = 2L_x(1 + \alpha_2\Delta T) + L_g(1 + \alpha_1\Delta T). \quad (2)$$

Согласно теории термоупругости, в определенном диапазоне температур скорость распространения продольной волны в среде имеет почти линейную зависимость от температуры. Пусть $V(T)$ — скорость продольной волны при температуре T и при отсутствии напряжений; V_0 — скорость продольной волны при начальной температуре без напряжений; β_ω — коэффициент скорости продольной волны с изменением температуры, а ΔT — изменение температуры, тогда можно получить уравнение зависимости скорости распространения ультразвука:

$$V(T) = V_0(1 - \beta_\omega\Delta T). \quad (3)$$

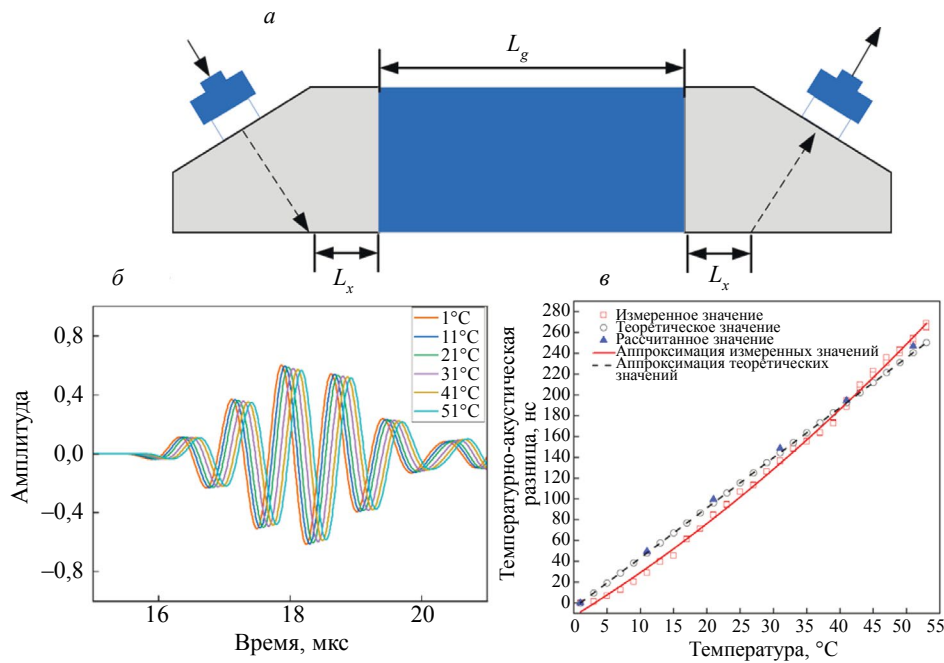


Рис. 7. Экспериментальные данные о влиянии температуры на контроль напряжений: модель температурной компенсации встроенного измерительного преобразователя (а); ультразвуковой контроль смоделированных эхосигналов с различными температурами (б); кривая температурно-акустической разницы во времени (в).

Без учета влияния температуры на внутреннюю кристаллическую решетку детали, изменение разности акустических времен, вызванное температурой, объединив уравнения (2) и (3), может быть выражено как

$$\Delta t = \frac{2L_x(1 + \alpha_2\Delta T) + L_g(1 + \alpha_1\Delta T)}{V_0(1 - \beta_\omega\Delta T)} - \frac{2L_x + L_g}{V_0}. \quad (4)$$

Поскольку в программном пакете Comsol для моделирования ультразвукового контроля напряжений используется идеальное условие контроля, связь между температурой и погрешностью контроля напряжений включает в себя влияние температуры на скорость распространения ультразвука, звуковой тракт и внутреннюю поверхность измеряемой заготовки. Различные температуры (1, 11, 21, 31, 41, 51°C) были заданы в программе для моделирования процесса ультразвукового контроля, и полученный эхосигнал КПП-волн показан на рис. 7б. С повышением температуры волна смещается вправо, а акустическая разница во времени постепенно увеличивается. В это время температура увеличивается, скорость распространения ультразвука уменьшается, звуковой тракт увеличивается. При комплексном воздействии этих факторов возникает разница во времени прохождения звука, что влияет на точность измерения напряжений.

Для подтверждения теоретических расчетов и результатов моделирования преобразователь был помещен внутрь камеры с термостатом, а провода выведены через щель в двери камеры. После установки датчика была выставлена температура, и эхосигналы регистрировались после выдерживания температуры в течение 5~10 мин с увеличением на каждые 2°C. В качестве калибровки использовалось время t_0 звуковой КПП-волны, измеренное при 1°C, а разница во времени получения звуковых сигналов записывалась последовательно, как показано на рис. 7в, и с помощью полинома второго порядка можно получить выражение для температуры и акустического времени:

$$t = 0,026T^2 + 3,92T - 12,55 + t_0. \quad (5)$$

Устанавливаем температуру калибровки как T_1 , а температуру контроля — как T_2 , и подставляем в уравнение (5), чтобы получить следующее выражение:

$$\Delta t = \Delta T(0,026(T_1 + T_2) + 3,92). \quad (6)$$

Согласно теоретическим расчетам, зависимость между акустической разницей во времени и температурой представлена в уравнении (4). Исходя из технических характеристик датчика, используемого в эксперименте, и детали, зависимость может быть определена так, что: $L_g = 1,6$ см; $L_x = 1$ см; $V_0 = 5800$ м/с; $\alpha_1 = 1,8 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$; $\alpha_2 = 3,0 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, а коэффициент скорости звука $\beta_\omega = 6 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, и теоретическая кривая зависимости между изменением температуры и акустической разницей времени построена в виде пунктирной линии на рис. 7в. В то же время, в соответствии с результатами моделирования, полученная акустическая разница во времени изображена в виде треугольной точки на рис. 7в. Сравнивая результаты моделирования, теоретические значения и данные экспериментов, можно сделать вывод, что результаты моделирования в основном совпадают с теоретическими значениями. Видно, что влияние температурного воздействия на изменение состояния решетки деталей на акустическую разницу во времени слабое и им можно пренебречь. Существуют различия между теоретическим и фактическим значением, но тенденция сохраняется. Причиной незначительной разницы может быть упрощение модели датчика, связующего агента датчика и точности температуры. Поэтому программное обеспечение системы может быть использовано для компенсации вариации акустического времени, вызванной температурным влиянием в соответствии с изменением полученных значений температуры, и повышения точности контроля напряжений.

3.2. Вывод формулы для ультразвукового измерения толщины

На основе результатов исследований, проведенных в разделе 3.1 по анализу ультразвуковых эхосигналов, отраженная волна преломленной поперечной волны рассматривается как волна, используемая для одновременного измерения толщины и напряжений. Согласно теории распространения ультразвука, при распространении преломленной поперечной волны к нижней поверхности заготовки возникает отраженная поперечная волна, которая направляется к верхней поверхности. На верхней поверхности она формирует поверхностную преломленную продольную волну и отраженную поперечную волну, которые распространяются к нижней поверхности, и далее все повторяются. Поэтому, установив угол падения на 29° , по закону Снеллиуса можно рассчитать угол преломления поперечной волны $\theta = 34^\circ$. Модель распространения ультразвука показана на рис. 8, она используется для вывода формулы измерения толщины ультразвукового покрытия. Между тем, согласно рис. 8, известно, что полученная формула измерения толщины ограничена соотношением между расстоянием между преобразователями L и $2b$: $L \geq 2b$. Поэтому измеряемая толщина имеет определенный диапазон. Согласно теоретическим выкладкам, используемый в данном эксперименте преобразователь с интервалом, равным 30 мм, может точно измерить максимальную толщину около 10 мм.

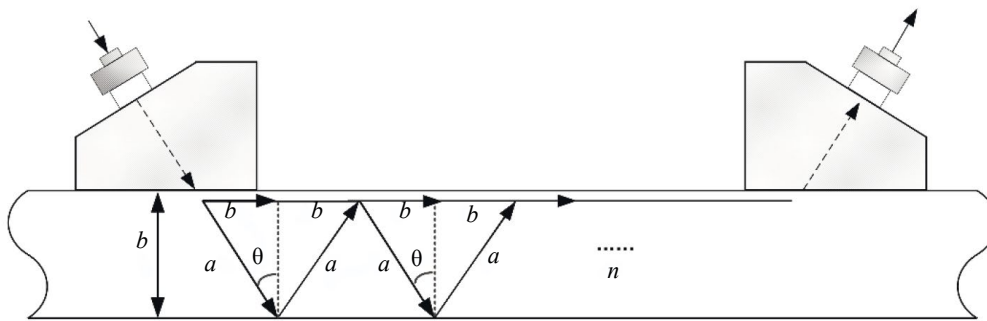


Рис. 8. Модель распространения ультразвука, соответствующая углу падения 29° .

Обозначим время прохождения КПП-волны от излучателя до приемника за t_0 , а длину звукового тракта за S_0 , тогда $\frac{S_0}{V_L} = t_0$. Отраженная поперечная волна распространяется до нижней поверхности, а затем отраженная поперечная волна распространяется к верхней поверхности изделия. Доля волны преобразуется в продольную волну, распространяясь вдоль поверхности. Звуковой тракт поперечной волны обозначим как $S_{1s} = 2a$, а звуковой тракт продольной волны — $S_{1l} = S_0 - 2b$, общее время как t_1 , которое рассчитывается как

$$\frac{2a}{V_s} + \frac{S_0 - 2b}{V_L} = t_1. \quad (7)$$

Вычитая $\frac{S_0}{V_L} = t_0$ из уравнения (7), получим:

$$\frac{2a}{V_s} - \frac{2b}{V_L} = t_1 - t_0. \quad (8)$$

Между тем, используя следующие тригонометрические соотношения: $a = \frac{h}{\cos\theta}$, $b = \frac{h\sin\theta}{\cos\theta}$, подстановка в уравнение (8) приводит к следующему виду уравнения:

$$h = \frac{V_L V_s \cos\theta}{2(V_L - V_s \sin\theta)} (t_1 - t_0). \quad (9)$$

Благодаря закономерностям преломления и отражения поперечной волны, можно получить уравнение по аналогии со свойствами распространения волн:

$$h = \frac{V_L V_s \cos\theta}{2n(V_L - V_s \sin\theta)} (t_n - t_0), \quad (10)$$

где n — число повторных отражений принимаемой поперечной волны.

3.3. Верификация в условиях натурального эксперимента

Экспериментальная верификация по совместному измерению толщины и напряжений на ступенчатых образцах ультразвуковым методом. На основе формулы для вычисления напряжений и формулы для совместного измерения толщины, полученных в данной работе, были проведены эксперименты по совместному ультразвуковому контролю ступенчатого блока, чтобы проверить точность и достоверность метода совместного определения напряжений и толщины. На рис. 9 показаны полученные ультразвуковые эхосигналы, соответствующие различным толщинам ступенчатого блока, с нормированной амплитудой колебаний. Ступенчатый блок был изготовлен с использованием одинакового способа, и существует небольшая разница в значениях напряжений, соответствующих ступеням с разной толщиной, что в основном соответствует положению волны a_L с разной толщиной на рис. 9, где положение отражения поперечной волны смещается назад по мере увеличения толщины ступенчатого блока. Это смещение назад связано с тем, что увеличение толщины приводит к удлинению тракта звука и большему затуханию энергии. Когда толщина увеличивается до определенной степени, положение волны может превысить положение приемного преобразователя датчика, в результате чего ультразвуковой сигнал не будет зарегистрирован. Поэтому подстановка данных разности акустических времен, соответствующих a_{S1} и a_L , в уравнение

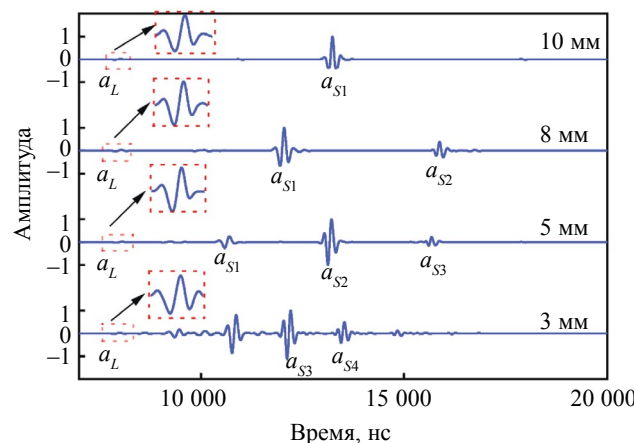


Рис. 9. Волна, зарегистрированная на ступенях с различной толщиной.

(9) позволяет точно измерить толщину. При наличии нескольких сигналов отражения преломленной поперечной волны на ультразвуковой частоте последняя волна отражения и данные акустической разности во времени, соответствующие КПП-волне, могут быть получены и подставлены в уравнение (10) для расчета средней толщины по нескольким отражениям.

Используя согласованный метод определения положения волны (например, пороговое максимальное значение), определенные волны в ультразвуковом эхосигнале были обнаружены и записаны. В условиях данного эксперимента КПП-волна для образца с нулевым напряжением соответствует $t_0 = 7820,6$ нс, а калибровка K составляет 3,4 МПа/нс. Получены значения времени t_0 волны a_L и времени t_1 волны a_{S1} на волновых изображениях, полученных с помощью ступенчатых блоков различной толщины. В табл. 1 представлены данные экспериментальных измерений напряжений и толщины ультразвуковым методом для ступенчатых блоков различной толщины. Напряжение σ и толщина h были рассчитаны с помощью формулы расчета напряжения $\Delta\sigma = K\Delta t_0$ и совместного измерения толщины по уравнению (9). Полученные данные по напряжениям показали незначительный разброс, соответствующий ступенчатым блокам, изготовленным по одному и тому же технологическому процессу, с точностью до 1 МПа. Данные по толщине совпали с данными, измеренными микрометром, причем точность погрешности повторных измерений неподвижным зондом составляет около 0,1 мкм или даже ниже. Для мобильного датчика, в зависимости от квалификации оператора, погрешность измерения толщины составляла от 0,1 до 0,01 мм.

Таблица 1

Экспериментальные данные по ультразвуковому контролю ступенек с различной толщиной

Экспериментальные данные Толщина, мм	Δt_0 , нс	σ , МПа	$t_1 - t_0$, нс	h , мм
2,630	10,7	36,4	1432,3	2,62704
4,995	10,5	35,7	2723,6	4,99548
7,826	10,4	35,4	4266,9	7,82610
9,904	10,8	36,7	5399,6	9,90363

Экспериментальная верификация по совместному измерению толщины и напряжений на нагруженных консольных балках ультразвуковым методом. Для проверки точности определения напряжений с помощью разработанного оборудования был проведен эксперимент по ультразвуковому контролю напряжений с использованием грузов для нагружения консольной балки вместо растягивающей машины, а нулевое напряженное состояние было откалибровано при отсутствии грузов. Каждый дополнительный груз увеличивал растягивающее напряжение на верхней поверхности консольной балки примерно на 11 МПа, при этом максимальное количество грузов составляло четыре. Графики ультразвуковых эхосигналов, полученных при различных условиях нагружения, показаны на рис. 10. Видно, что тенденция изменения волны при различных условиях нагружения для одного и того же материала остается в основном

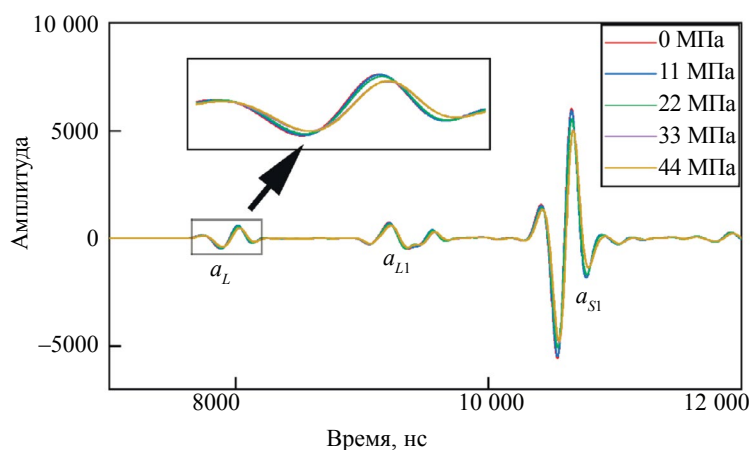


Рис. 10. Измеренная волна с постоянной прочностью балки при различных приложенных напряжениях.

Таблица 2

Данные по ультразвуковому контролю нагруженных балок

Экспериментальные данные Напряжение, МПа	Δt_0 , нс	σ , МПа	$t_1 - t_0$, нс	h , мм
0	0	0	2722,9	4,99418
11	3,3	11,2	2723,6	4,99547
22	6,4	21,8	2725,3	4,99859
33	9,8	33,3	2728,1	5,00372
44	13,0	44,2	2726,6	5,00097

неизменной. В целом, расположение КПП-волны смещается, причем смещение увеличивается по мере увеличения напряжений при нагружении. Это смещение положения по сравнению с состоянием нулевого напряжения указывает на увеличение акустической разности во времени КПП-волны в соответствии с формулой ультразвукового определения напряжения.

Используя согласованный метод регистрации сигналов, было проанализировано время t_0 КПП-волны, соответствующее различным напряженным состояниям в ультразвуковых эхоизображениях консольной балки, представленной на рис. 10. В данном эксперименте ненагруженное состояние рассматривалось как состояние с нулевым напряжением, с соответствующим временем КПП-волны $t_0 = 7809,3$ нс. Калибровочная константа K была определена равной 3,4 МПа/нс. Согласно формуле ультразвукового контроля напряжений, измеренные значения напряжений для равномерно напряженной балки, как показано в табл. 2, соответствуют ожидаемым значениям напряжений с точностью до 1 МПа. Повторные измерения с помощью неподвижного преобразователя дают погрешность измерения около 0,1 МПа или даже ниже, измерения с помощью подвижного преобразователя могут отличаться на ± 1 –5 МПа в зависимости от квалификации пользователя. Кроме того, на основе принципа совместного измерения толщины, описанного в данном исследовании, были проанализированы данные по толщине на рис. 10. Положение волны a_{S1} постепенно смещается назад по мере изменения положения волны a_L . Зафиксировав время t_1 волны a_{S1} , было обнаружено, что акустическая разница во времени между волнами a_L и a_{S1} остается постоянной. Данные по толщине, полученные с помощью уравнения (8), соответствуют измеренной толщине равномерно напряженной балки, причем измеренные данные по толщине могут быть выполнены с точностью до 0,01 мм.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Точность и стабильность данных об акустической разности во времени для продольных волн с критическим преломлением влияют на точность ультразвукового контроля напряжений в материалах. Минимальное разрешение временной разницы и стабильность данных в первую очередь определяются частотой, битовой глубиной и оптимизацией фильтрации платы сбора данных УЗК. Существующее оборудование для контроля напряжений часто имеет такие проблемы, как низкая стабильность и искажение волн из-за низкой частоты сбора и глубины битов. В данной работе оптимизировано оборудование для сбора данных ультразвуковых измерений путем оптимизации частоты сбора данных и алгоритма. Было подтверждено, что точность повторных измерений с помощью стационарного датчика в эксперименте по ультразвуковому измерению напряжения и толщины консольной балки составляет около 0,1 МПа или даже ниже. Измерения с помощью передвижного измерительного преобразователя давали погрешность ± 1 –5 МПа, а точность измерений можно было дополнительно повысить с помощью автоматизированного метода механического закрепления.

Для одного и того же материала значение K , рассчитанное на основе расстояния между зондами, уменьшается по мере увеличения расстояния между зондами, что указывает на отрицательную корреляцию. Для одного и того же изменения напряжения меньшее значение K соответствует большей акустической разнице во времени, что требует меньшей точности при сборе акустической разницы во времени. Это распространенный метод, используемый для повышения точности в низкочастотном оборудовании для измерения напряжений. С увеличением расстояния между датчиками увеличивается затухание энергии, а за счет увеличения амплитуды увеличивается количество помех, что влияет на точность и стабильность результатов измерения. Однако в данной работе количество помех не увеличивается значительно с увеличением расстояния между точками, что связано с более высокой частотой сбора оборудования, большим

количеством эффективных точек сбора, и эффективная волна не заглушается помехами. В то же время управление углом падения зонда может эффективно ослабить смещение гармоник, следующих за КПП-волной, что позволяет использовать составляющие гармоники для одновременного измерения толщины. При изменении угла падения ультразвуковой волны излучаемая энергия главного лепестка преломленной продольной волны смещается, что помогает уменьшить перекрытие волн, вызванное преломлением продольной волны. Влияние температуры на ультразвуковой контроль напряжений в основном обусловлено тепловым расширением и сжатием, вызванным изменением температуры, и влиянием на скорость распространения ультразвука. Изучение формул по компенсации температурных воздействий может еще больше повысить точность метода. Кроме того, частота и размер пластин, используемых в датчике, оказывают определенное влияние на распространение ультразвуковых волн и влияют на точность контроля напряжений и точность определения толщины. Различные частоты и размеры пластин имеют разную энергию излучения, что приводит к существенному затуханию волны и слабой интенсивности пика. Поэтому разработка узкоимпульсных зондов с высоким демпфированием может эффективно уменьшить волновой хвост и дополнительно повысить точность измерения напряжений.

В данной работе выведена формула совместного измерения толщины и проверена ее точность с помощью экспериментов по совместному ультразвуковому измерению толщины с использованием ступенчатых блоков. По сравнению с существующим методом измерения толщины с помощью вертикального падающего эха, этот подход не требует замены оборудования или датчиков, позволяя получать данные о толщине одновременно с контролем напряжений. Хотя диапазон измерения толщины ограничен расстоянием между датчиками, он может удовлетворить потребности в совместном измерении толщины в рабочих процессах контроля напряжений. При этом точность измерения толщины повышается благодаря высоким требованиям к частоте и глубине битов оборудования, используемого для контроля напряжений. Точность повторных измерений толщины с помощью неподвижных датчиков составляет около 0,1 мкм, в то время как измерения с помощью подвижных датчиков могут приводить к ошибкам в пределах 0,1 мм ~ 0,01 мм в зависимости от квалификации персонала.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена оптимизации обработки эхосигналов путем изучения частоты выборки и битовой глубины. С помощью моделирования и экспериментов было проанализировано влияние угла падения измерительного преобразователя, расстояния между преобразователями и температуры на значение K и на волны. Была выведена формула для совместного измерения толщины, основанная на наклонном падении, и ее точность была проверена в ходе экспериментов со ступенчатым испытательным блоком и нагружаемой консольной балкой. Полученные выводы сводятся к следующему:

(1) Минимальное разрешение и стабильность данных акустической разницы во времени в основном определяются частотой выборки, битовой глубиной и возможностями оптимизации фильтров платы сбора данных УЗК. Эффективное количество точек выборки увеличивается с увеличением частоты выборки, тем самым улучшая минимальное разрешение. Аналогично, минимальное разрешение акустической разницы во времени также улучшается с увеличением битовой глубины. Совместный эксперимент по ультразвуковому измерению напряжений и толщины с использованием равномерно нагруженной балки подтверждает, что погрешность повторных измерений с неподвижным датчиком составляет около 0,1 МПа или даже ниже, в то время как измерения с подвижным датчиком могут привести к погрешности $\pm 1 \sim 5$ МПа.

(2) Для одного и того же материала значение K постепенно уменьшается с увеличением расстояния между зондами, при этом наблюдается отрицательная корреляция. Постоянный коэффициент ω_0 , используемый для расчета значения K , может быть определен для того же материала. Для образца стали Q235, измеренного в данном исследовании, $\omega_0 = 0,104$ МПа·м/нс.

(3) Оптимальный угол наклона ультразвукового датчика для одновременного измерения напряжений и толщины составил 29° . В этом случае главный лепесток энергии преломленной продольной волны преломляется в заготовке, что приводит к затуханию волн a_L и a_{L1} . Однако эхосигнал волны a_{S1} остается стабильным и четким, а эхосигнал волны a_{S1} , несущий информацию о толщине, также относительно стабилен и неискажен, что позволяет использовать его в качестве волны для контроля толщины.

(4) Температура влияет на качество контроля напряжений, изменяя время распространения КПП-волны. При повышении температуры тепловое расширение стальных изделий приводит к увеличению длины пути распространения КПП-волны, в то время как скорость распростране-

ния ультразвука уменьшается. Совокупный эффект этих изменений приводит к увеличению времени распространения КПП-волны. Кривая зависимости между температурой и временем распространения была изучена и определена.

(5) Была выведена формула для одновременного измерения напряжения и толщины на основе наклонного падения. В то же время для проверки результатов был проведен ультразвуковой контроль совместного измерения толщины с помощью ступенчатого блока. Точность погрешности повторного измерения толщины неподвижным зондом составляет около 0,1 мкм или даже ниже, а погрешность измерения подвижным зондом составляет 0,1 мм ~ 0,01 мм.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jinyao D., Kai S., Wenyu X., Guangming J., Chuang S. Application of Alternating Current Stress Measurement Method in the Stress Detection of Long-Distance Oil Pipelines % // J. Energies. 2022. V. 15 (14). P. 4965—4965. <https://doi.org/10.3390/EN15144965>
2. Zhao Wei. Research on Stress Detection Methods of Steel Structures Using Critically Refracted Longitudinal Waves Ultrasonic Method // Sichuan Building Science Research. 2023. V. 49 (02). P. 58—66. <https://doi.org/10.19794/j.cnki.1008-1933.2023.0021>
3. Chaki S., Ke W., Demouveau H. Numerical and experimental analysis of the critically refracted longitudinal beam // Ultrasonics. 2013. V. 53 (1). P. 65—69. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.03.014>
4. Yu Wenguang, Li Yukun, Zhang Mengxian et al. Quantitative Analysis of Main Influencing Factors in Measuring Pipeline Stress Using Ultrasonic Method // Nondestructive Testing. 2019. V. 41 (8). P. 11—15. <https://doi.org/10.11973/wsje201908003>
5. Nicolás P. Y. M. M., Flávio B. et al. Self-compensation methodology for ultrasonic thickness gauges // Ultrasonics. 2023. P. 135107105—107105. <https://doi.org/10.1016/J.ULTRAS.2023.107105>
6. Rose L.J. Ultrasonic Guided Waves in Solid Media. Cambridge University Press, 2014. P. 06—15. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107273610>
7. Song Wentao, Pan Qinxue, Xu Chunguang et al. Residual Stress Nondestructive Testing for Pipe Component Based on Ultrasonic Method / 2014 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology&Application. 2014. P. 163—167. <https://doi.org/10.1109/FENDT.2014.6928254>
8. He Jingbo. Absolute Axial Stress Detection Method of Steel Components Based on Ultrasonic Method. Harbin Institute of Technology, 2020. <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.005113>
9. Hou Huaishu, Fang Xinchong, Zhang Runze et al. Thin-walled metal round straight seam welded pipe residual stress ultrasonic testing // Manufacturing technology and machine tools. 2022. No. 02. P. 126—130. <https://link.cnki.net/doi/10.19287/j.cnki.1005-2402.2022.02.023>
10. Shuai Zhuming, Jia Guangming, Cheng Zhiqiang. Calibration and Analysis of Ultrasonic Stress Coefficient Based on Finite Element Simulation // APPLIED ACOUSTICS. 2024. V. 43 (02). P. 461—468. <https://doi.org/10.11684/j.issn.1000-310X.2024.02.026>
11. Yu Wenguang. Research on Key Technologies of Ultrasonic Non-Destructive Testing for Pipeline Stress. China University of Petroleum (East China), 2019. <https://doi.org/10.27644/d.cnki.gsydu.2019.000621>
12. Guo Mocheng. Research and Correction of Stress Detection Influencing Factors Based on Critical Refraction Longitudinal Wave Method. Sichuan Agricultural University, 2021. <https://doi.org/10.27345/d.cnki.gsnyu.2021.000437>
13. Yang Shunmin, Mingquan Wang, Lu Yang. Investigation of Uncertain Factors on Measuring Residual Stress with Critically Refracted Longitudinal Waves // Applied Sciences. 2019. V. 9. No. 3. P. 485. <https://doi.org/10.3390/app9030485>
14. Egle D.M., Bray D.E. Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel // J. Acoust. Soc. Am. 1 September 1976. V. 60 (3). P. 741—744. <https://doi.org/10.1121/1.381146>
15. Yang Shunmin. Research on Key Influencing Factors of Residual Stress Detection by Critical Refraction Longitudinal Wave. North University of China, 2019. <https://doi.org/10.27470/d.cnki.ghbgc.2019.000005>
16. Jia D., Bourse G., Chaki S. et al. Investigation of Stress and Temperature Effect on the Longitudinal Ultrasonic Waves in Polymers // Research in Nondestructive Evaluation. 2014. V. 25 (1). P. 20—29. <https://doi.org/10.1080/09349847.2013.820371>
17. Pan Qinxue, Shao Sing, XIAO Dingguo et al. Research on Ultrasonic testing method of Bolt tightening Force Based on Form factor // Acta Armarii. 2019. V. 40 (04). P. 880—888. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2019.04.024>
18. Niu Xiaochuan, Zhu Liqiang, Yu Zujun et al. Seamless rail the effect of temperature on the stress of nonlinear ultrasonic testing in the // Acta. 2019. V. 44 (02). P. 241—250. <https://doi.org/10.15949/j.carol carroll nki.0371-0025.2019.02.011>
19. Zhang Y.C. Study on the influence of temperature effect on ultrasonic Testing of axial stress of steel members. Harbin Institute of Technology, 2022. <https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2022.001344>