

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ

УДК 620.179

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-67-78

Оценка параметров ультразвукового контроля паяных соединений плашек буровых ключей*

Л. В. Волкова, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Платунов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. А. Петров, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Плашки бурового ключа представляют собой элементы бурильного оборудования, используемые для обеспечения надежного захвата в процессе установки и демонтаже бурильных труб. Высокие нагрузки и агрессивные условия эксплуатации устанавливают требования по контролю качества данных элементов. Своевременная диагностика усталостных повреждений и деформаций на ранних стадиях, а также использование неразрушающих методов, позволяют минимизировать риск аварий и увеличить срок службы бурового оборудования. Работа направлена на определение оптимальных параметров ультразвуковых волн для оценки акустической анизотропии плашек буровых ключей с учетом контроля качества паяных соединений. В статье представлены результаты исследований по оценке акустической анизотропии и поиску дефектов сплошности в плашках буровых ключей, позволяющие определить оптимальные параметры ультразвуковых волн для контроля качества паяных соединений плашек. Оценка акустической анизотропии осуществлялась с использованием двух типов волн – головной волны и волны Рэлея. Исследование включало анализ различных частотных диапазонов с целью выявления максимальной чувствительности к анизотропному состоянию образцов. Ультразвуковой контроль качества паяных соединений осуществлялся как без стандартного образца, так и с его использованием, что позволило оценить разброс амплитуд сигналов, отраженных от паяного соединения. Для повышения точности контроля был выбран иммерсионный способ, исключающий влияние качества контакта с поверхностью. Контроль был выполнен на 12 образцах, каждый из которых проверялся в 8-9 точках с использованием ультразвукового дефектоскопа DIO1000 PA и преобразователя П112-10. Опорным значением служило среднее значение амплитуды сигнала от свободной границы образца. В ходе экспериментов определен наиболее чувствительный диапазон частот пьезоэлектрических преобразователей для контроля анизотропии плашек буровых замков. Выявлено, что основания плашек обладают значительной анизотропией, которая снижается после пайки. Полученные данные об амплитуде отраженной акустической волны от медной пленки совпадают с расчетными значениями, что подтверждает эффективность иммерсионного метода для контроля сплошности соединений. На участках с дефектами пайки амплитуда отраженного сигнала значительно увеличивается по сравнению с бездефектными.

Ключевые слова: плашки буровых ключей, головная волна, волна Рэлея, анизотропия, ультразвуковой контроль, паяное соединение.

Введение
Плашки бурового ключа представляют собой элементы бурильного оборудования, используемые для обеспечения надежного захвата в процессе установки и демонтаже бурильных труб и другого бурового оборудования. Плашки обеспечивают надежное сцепление, что предотвращает проскальзывание труб во время их вращения или перемещения.

Высокий уровень нагрузки, постепенный износ и воздействие агрессивных сред обуславливает необходимость контроля качества плашек в процессе производства и эксплуатации. Высокий уровень напряжений в материале может стать причиной трещин и разрушений, кроме того, может негативно влиять на точность и эффективность захвата бурильного инструмента, что повышает риск изломов и аварий в условиях буровых работ. На начальных этапах разруше-

© Волкова Л. В., Платунов А. В., Петров Д. А., 2024

* Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FZZN-2025-0003) с использованием уникальной научной установки «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. № 586308).

ния изделий, до появления макроскопических трещин, процесс усталостного повреждения составляет около 80...90 % от общего времени эксплуатации [1]. В связи с этим важным этапом для обеспечения безопасной работы узлов конструкций является своевременная и эффективная оценка усталостной деформации, которая позволяет принять необходимые меры по обслуживанию и ремонту. Однако развитие усталостного разрушения представляет собой сложный процесс, в который входят зарождение дислокаций, образование субзерен и формирование микротрещин на микроуровне [2–4]. Таким образом, количественная оценка усталостных повреждений и деформаций на ранней стадии является достаточно сложными задачами.

Решение задачи минимизации таких деформаций в плашках буровых ключей заключается в оценке распределения напряжений на этапах изготовления с использованием неразрушающих методов. Информация о распределении напряжений позволила бы уменьшить деформацию путем выбора наилучшей обработки (температура пайки, выбор инструментов, выбор скоростей инструмента и др.). В связи с этим оценка остаточных напряжений, структуроскопия и дефектоскопия позволяют своевременно выявлять отклонения от требуемых характеристик и предотвращать аварийные ситуации.

Необходимо учитывать, что анизотропия металла существенно влияет на распределение остаточных напряжений, поскольку неоднородная структура металла появляется в результате пластической деформации.

Для определения анизотропии в плашках могут быть использованы различные методы неразрушающего контроля, такие как рентгенографический анализ, ультразвуковая диагностика и магнитный метод. Эти технологии позволяют без разрушения структуры материала выявлять дефекты и оценивать уровень структурной анизотропии.

Ультразвуковой контроль (УЗК) зарекомендовал себя как высокочувствительный к внутренним и поверхностным повреждениям [5–7]. Затухание и скорость ультразвука обычно связаны с развитием дислокационных структур во время усталости [8–10]; кроме того, ультразвуковые волны являются потенциальным инструментом для оценки характеристик усталостных повреждений на ранних стадиях. При этом одним из показателей оценки напряженного состояния металла является акустическая анизотропия, которая свидетельствует не только о высоких значениях напряжений, но и может

свидетельствовать о наличии локальных дефектов или других микроструктурных особенностей в материале [11].

Разработаны различные методики использования ультразвуковых волн для оценки напряженно-деформированного состояния металла. Среди них хорошо зарекомендовали себя объемные волны, которые дают соответствие экспериментальных результатов и данных исследований, основанных на характеристиках микроструктуры при усталостном повреждении [12]. Также для исследования структуры и повреждений на поверхности может быть использована волна Рэлея из-за ее чувствительности к повреждению поверхности в пределах одной длины волны и преимущества распространения на большие расстояния вдоль поверхности [13–15]. Однако недостатком является чрезмерная чувствительность к шероховатости поверхности. Продольная волна с критическим преломлением (LCR) представляет собой разновидность волны, распространяющейся параллельно поверхности, глубина проникновения достигает одной-двух длин волн, что обеспечивает контроль более глубоких слоев объекта контроля [16, 17]. Кроме того, головная волна может быть полезна для выявления дефектов даже на шероховатых поверхностях, а также использована для измерения напряжений [18].

Учитывая значимость прочности и надежности паяных соединений в эксплуатации буровых инструментов, необходимо провести комплексный анализ, который позволит выявить возможные дефекты и улучшить характеристики паяных соединений.

Контроль качества паяных соединений требует применения современных методик и технологий, позволяющих эффективно выявлять дефекты. Рентгеновский метод, используемый для контроля качества паяных соединений, имеет свои ограничения, выявляемость плоских дефектов зависит от ориентации этих дефектов относительно направления распространения рентгеновских лучей, что снижает общую эффективность контроля [19].

В качестве альтернативы возможно применение ультразвукового метода, который демонстрирует высокую эффективность в контроле паяных соединений. Использование сфокусированного высокочастотного преобразователя позволило выявить дефекты, которые не поддаются радиографическому контролю. Ультразвуковой эхоимпульсный метод позволяет проводить контроль объектов со сложной геометрической формой и потенциальными дефектами паяных

соединений, такими как непропай и частичный непропай [20, 21].

Целью данной работы является определение оптимальных параметров ультразвуковых волн для оценки акустической анизотропии плашек буровых ключей с учетом контроля качества паяных соединений.

Таким образом, данное исследование направлено на разработку методики контроля качества и долговечности буровых ключей, а также обеспечение их безопасной эксплуатации.

Используемые методы и подходы

Сухарь бурового ключа ZQ-203 предназначен для оснащения буровых ключей, предназначенных для раскрепления, развинчивания и свинчивания бурильных труб при спускоподъемных операциях.

Основание сухаря ZQ-203 изготавливают из стали 40ХН2МА ГОСТ 4543–2016 или стали 45 ГОСТ 1050–2013. Для более сильного контакта с поверхностью труб в паз основания закрепляется твердосплавная пластина, имеющая с одной стороны плоскую поверхность для соединения с пазом сухаря при помощи пайки, а с другой стороны содержащая выпуклую поверхность с пятью продольными выступами для зажима цилиндрических поверхностей труб. Закрепление осуществляется с использованием пайки с использованием флюса марки 100 для пайки твердосплавного инструмента по ТУ 48 4 346–84 и порошка медного электролитического по ГОСТ 4960–2017.

В настоящее время при проведении пайки в составе сборки плашки после остывания происходит коробление основания. Сборку выгибает в центре в сторону твердого сплава. Напряженно-деформированное состояние, возникающее при действии на плашку температурных полей, является одной из основных характеристик, определяющих дальнейшую эксплуатацию плашек. Изменение геометрии плашки может привести к разрушению конструкции и браку изделия, что, соответственно, приводит к увеличению стоимости оборудования.

В ходе проведения измерений были проконтролированы 8 плашек сухаря ZQ-203 и 5 подложек к ним длиной 58 мм, шириной 45 мм, толщиной 5 мм, на внутренней поверхности сухаря с использованием медного припоя напаяна заборная часть. Рабочая зона для установки ультразвукового преобразователя 37 мм.

В процессе измерения скоростей распространения волн преобразователь поворачивался от 0° до 360° с шагом 45° относительно продольной оси плашки (рис. 1).

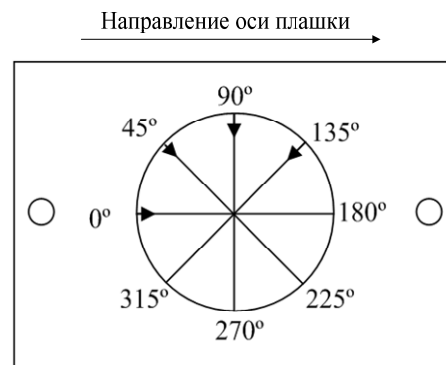


Рис. 1. Схема проведения измерений и направление прозвучивания

Fig. 1. Measurement scheme and scan direction

Для проведения контроля и поиска информативных данных контроль проводился с использованием двух типов волн – головной (*LCR*) и рэлеевской (*R*).

Для регистрации принятых сигналов использовался высокочастотный дефектоскоп DIO1000 PA, позволяющий регистрировать сигналы с частотой дискретизации 200 МГц, что обеспечивает точность в измерении времени 5 нс.

Ультразвуковой дефектоскоп DIO1000 PA генерирует высокочастотный генерирующий импульс на возбуждающую пьезопластину, сигнал ультразвуковой волны проходит по объекту контроля и принимается приемным преобразователем. В зависимости от наличия микроскопических дефектов в металле или анизотропии свойств, включая остаточные напряжения, которые влияют на механические и другие физические свойства, скорость волны будет изменяться. Дефектоскоп DIO1000 PA позволяет сохранять полученные осциллограммы сигналов в память и затем передавать на персональный компьютер для дальнейшего анализа скоростей или частотных характеристик принимаемых сигналов.

Полученные на дефектоскопе DIO1000 PA эхограммы обрабатывались программой Mathcad. Программа позволяет проводить корреляционную обработку сигналов для повышения точности измерения скоростей распространения волн при измерении задержки ультразвуковых импульсов относительно сигнала, измеренного на СО2 (рис. 2).

Время корреляции импульсов было определено на анализе временных задержек между ультразвуковыми сигналами. Каждый импульс с плашки бурового ключа фиксируется с высокой точностью, а затем сопоставляется с сигналом, полученным на стандартном образце СО2. Данный алгоритм обработки позволяет опреде-

лить время корреляции и оценить временной интервал, в течение которого сигнал распространяется по объекту контроля.

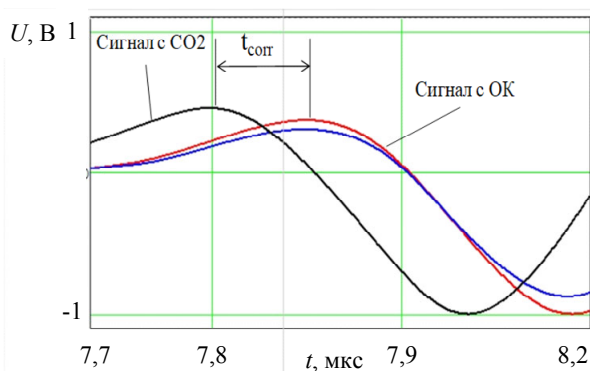


Рис. 2. Алгоритм обработки сигнала в программе Mathcad

Fig. 2. Signal processing algorithm in Mathcad programme

Для расчета скоростей головной и рэлееской волны использовалась скорость распространения данных волн в стандартном образце CO₂.

Оценка скоростей волн производилась по формулам

$$C_{LCR} = \frac{C_{LCR_0} t_{CO_2}}{t_{CO_2} + t_{COrr}}, \quad (1)$$

где t_{CO_2} – время распространения головной волны в CO₂; t_{COrr} – время корреляции импульсов; C_{LCR_0} – скорость распространения головной волны в образце CO₂ (5900 м/с);

$$C_R = \frac{C_{R_0} t_{CO_2}}{t_{CO_2} + t_{COrr}}, \quad (2)$$

где t_{CO_2} – время распространения рэлееской волны в CO₂; t_{COrr} – время корреляции импульсов; C_{R_0} – скорость распространения рэлееской волны в образце CO₂ (3000 м/с).

С целью адаптации преобразователя к объекту контроля в связи с наличием паяного соединения и высокой шероховатости поверхности были разработаны несколько конструкций преобразователей, работающих на различных частотах. Подобран оптимальный габарит преобразователей с жестко фиксированной базой 16 мм. Для обеспечения качества акустического контакта использовался прижимной постоянный магнит. Рабочие частоты разработанных преобразователей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики пьезоэлектрических преобразователей

Table 1. Characteristics of piezoelectric transducers

№ ПЭП	Рабочая частота f , МГц			
	LCR1	LCR2	LCR3	LCR4
Головная волна (LCR)	3,6	2,7	4,7	9,0
№ ПЭП	R1	R2	R3	R4
Волна Рэлея (R)	4,0	2,7	5,8	3,7

Ультразвуковой контроль качества паяных соединений сухаря бурового ключа ZQ-203 выполняется в соответствии с ГОСТ 26126, где предполагается способ контроля как без стандартного образца (оценивается разброс значений амплитуд сигналов отраженных от паяного соединения на одной плашке выше установленного критерия), так и с помощью стандартного образца (оценивается отклонение амплитуд сигналов, отраженных от паяного соединения относительно опорного уровня, полученного по СОП, свыше установленного значения).

При контактном способе контроля обнаружен большой разброс в значениях амплитуд отраженных от паяного слоя сигналов, что объясняется качеством контакта пьезопреобразователя с поверхностью объекта контроля. Для исключения такого влияния был сделан выбор в пользу иммерсионного способа ввода и приема волн.

Таким образом, контроль был проведен на 12 образцах плашек, каждый контролировался в 8-9 точках с поверхности основания плашки (рис. 3, а). В качестве основного оборудования использовались: ультразвуковой дефектоскоп DIO1000 PA, раздельно-совмещенный преобразователь П112-10. За опорный сигнал принято среднее значение амплитуды отраженного сигнала от свободной границы (образец основания плашки) (рис. 3, б).

Результаты акустической структуроскопии

Результаты оценки скоростей волн для сухарей и оснований для головной волны для волны Рэлея представлены на рисунке 4.

Погрешность в измерении скоростей головной волны составляет 0,5 м/с, а рэлееской – 2 м/с, что связано с чувствительностью рэлееской волны к качеству поверхности и контакта.

Из представленных графиков видно, что при изменении направления распространения волны относительно продольной оси плашки и ее основания значительно меняется скорость волны для основания плашки, и скорость волны практически не изменяется для плашек с напайкой. Так, скорость головной волны для плашки с на-

пайкой изменяется на 7 м/с, а для оснований плашек – на 35 м/с; для волны Рэлея скорости волн изменяются на 2 м/с для плашек с напайкой, и на 28 м/с – для оснований плашек.

С целью выявления преобразователей, более чувствительных к изменению скоростей волн всех исследуемых объектов была проведена оценка акустической анизотропии.

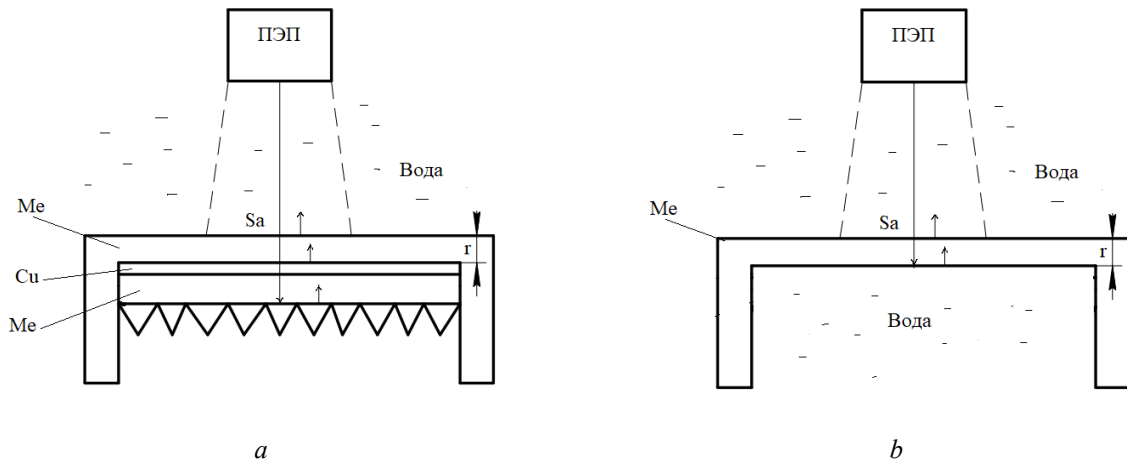


Рис. 3. Акустический тракт волны и ее отражение от паяного слоя (а) и от границы сталь – вода (b)

Fig. 3. Acoustic path of the wave and its reflection from the soldered layer (a) and from the steel-water boundary (b)

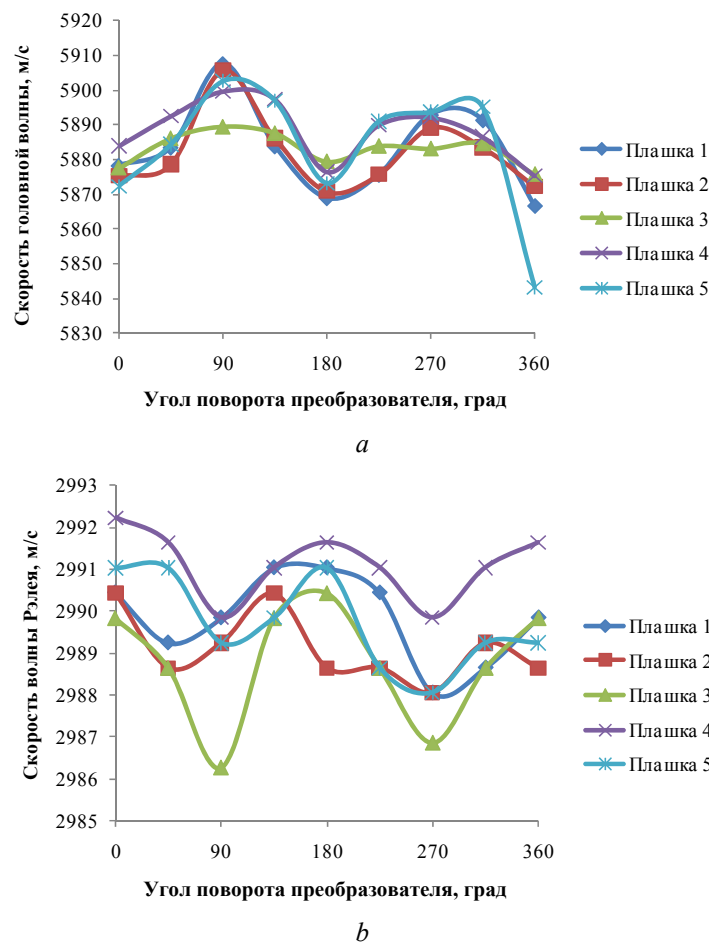


Рис. 4. Изменение скорости головной волны для ПЭП LCR 3 (а) и скорости рэлеевской волны (b) для ПЭП R2 в зависимости от угла поворота преобразователя относительно оси плашки

Fig. 4. Change in the velocity of the critically refracted longitudinal (LCR) waves for the LCR 3 PET (a) and the velocity of the Rayleigh wave (b) for the R2 PET depending on the angle of rotation of the transducer relative to the axis of the plate

Оценка модуля акустической анизотропии оценивалась по формуле

$$a = \left| \frac{C_{90} - C_0}{(C_{90} + C_0) / 2} \right|, \quad (3)$$

где C_0 – скорость волны по оси плашки; C_{90} – скорость волны в направлении 90° относительно оси плашки.

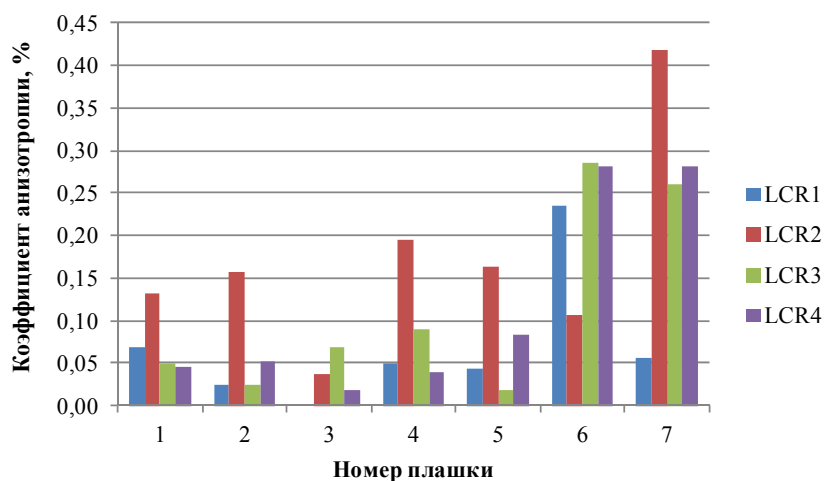
Результаты оценки акустической анизотропии для плашек с напайкой и их оснований, измеренные с использованием головной волны, представлены на рисунке 5.

Из анализа гистограмм видно, что акустическая анизотропия наблюдается для оснований

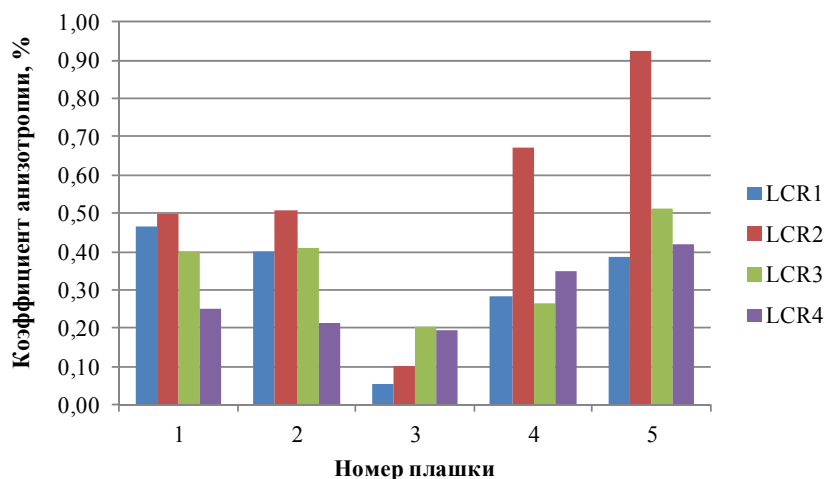
плашек и достигает 0,9 %, при этом наиболее чувствительным является преобразователь с частотой 2,7 МГц. Для плашек с напайкой акустическая анизотропия в два раза ниже и достигает величины 0,4 %.

Результаты акустической анизотропии для плашек с напайкой и оснований, измеренные с использованием рэлеевской волны, представлены на рисунке 6.

По гистограммам видно, что акустическая анизотропия наблюдается для оснований плашек и достигает 1 %, при этом наиболее чувствительным является преобразователь с частотой 3,7 МГц. Для плашек с напайкой акустическая анизотропия в несколько раз ниже и достигает величины 0,2 %.



a



b

Рис. 5. Гистограммы акустической анизотропии плашек, измеренные с использованием головной волны с напайкой (a) и оснований (b)

Fig. 5. Histograms of acoustic anisotropy of drill key dies measured using the critically refracted longitudinal wave with soldering (a) and bases (b)

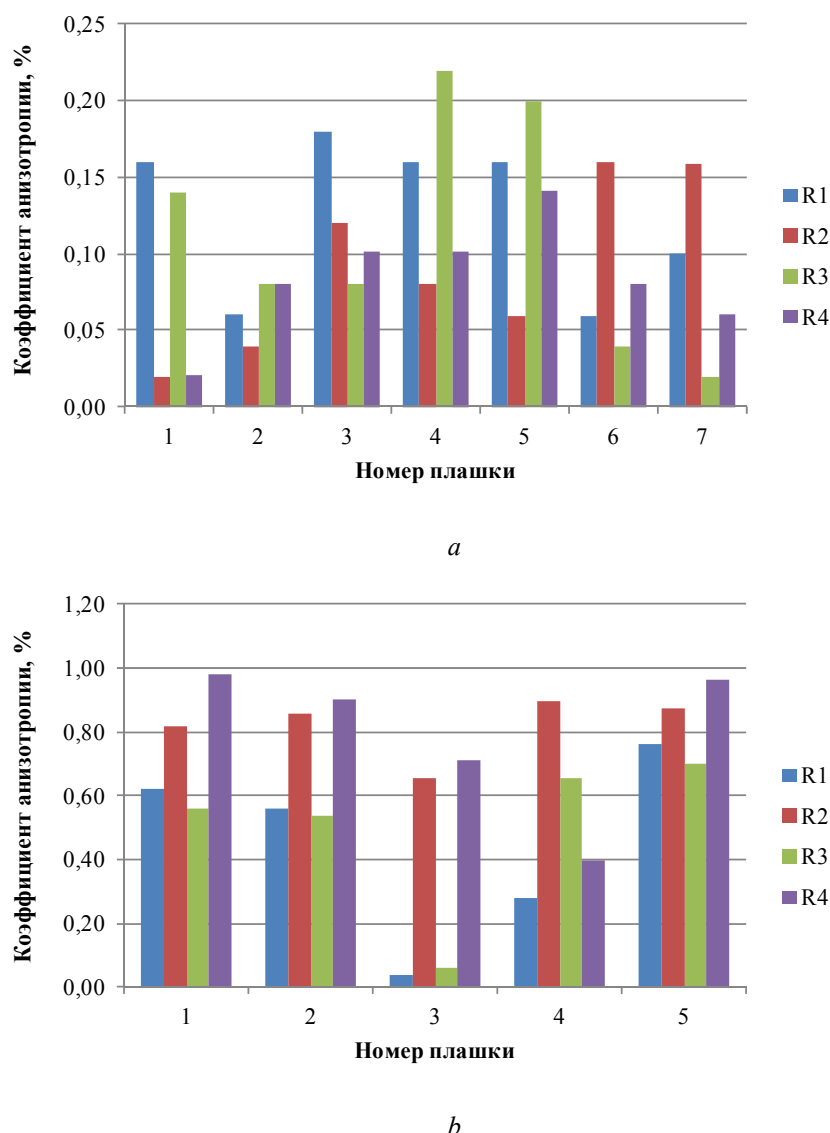


Рис. 6. Гистограммы акустической анизотропии плашек, измеренные с использованием рэлеевской волны с напайкой (а) и оснований (b)

Fig. 6. Histograms of acoustic anisotropy of drill key dies measured using the Rayleigh wave with soldering (a) and bases (b)

Изменение чувствительности контроля к анизотропии на низких и высоких частотах связано с глубиной проникновения волн в материал. На низких частотах волны проникают глубже, что позволяет им взаимодействовать со слоями металла с разными структурами, что усиливает анизотропные эффекты. Напротив, на высоких частотах волны проникают менее глубоко, контролируя только поверхностный слой, что может снижать выраженность анизотропии.

Различия в максимальных значениях скорости волны, при направлении в 0° (по оси распространения) и в направлении 90° (перпендикулярно оси распространения) связаны с технологией изготовления, в частностиковка и последующая

термическая обработка приводят к неоднородностям в структуре металла, что, в свою очередь, влияет на механические и упругие характеристики.

Результаты акустической дефектоскопии

Ультразвуковой контроль сплошности паяных соединений. Результаты оценки амплитуды сигнала от свободной границы и от паяного соединения в плашках представлены на рисунке 7. Максимальное отклонение амплитуды сигнала в основании плашки составляет 0,2 дБ.

Отклонение значений эхосигнала от опорного находится в диапазоне от 3 до 9 дБ для бездефектных плашек. Такой разброс можно объяснить различиями в контролируемой поверхности образцов – основание образцов № 1–6

обработано фрезеровкой, а образцы № 7–9 прошли дробеструйную обработку. Поскольку для определения опорного сигнала использован образец с отфрезерованной поверхностью ввода, сравнивать амплитуды сигналов, полученных на образцах № 7–9, некорректно. Амплитуды сиг-

налов в образце № 3 ниже, чем в других образцах, по причине термической операции отжига при температуре 1080 °С. На поверхности имеются следы окалины, а структура медного слоя могла измениться, так как практически была достигнута температура плавления меди.

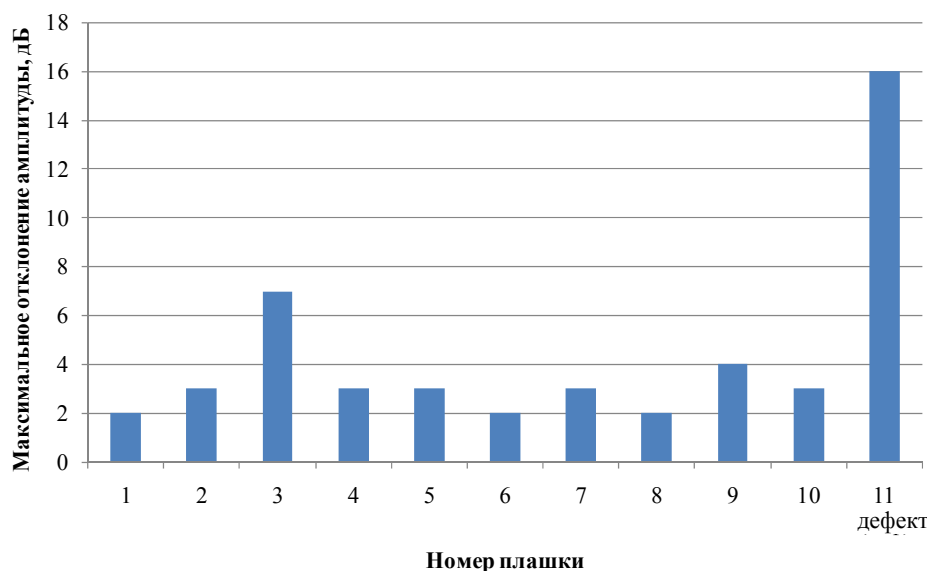


Рис. 7. Гистограмма отклонения амплитуд сигналов в плашках

Fig. 7. Histogram of signal amplitude deviation in the drill key dies

На образцах с моделированным дефектами пайки обнаружено резкое повышение амплитуды сигнала: до минус 16 дБ относительно бездефектных участков и до минус 11 дБ относительно опорного сигнала.

Для сопоставления полученных экспериментальных данных проведен расчет амплитуды сигнала, отраженного от паяного соединения с помощью формул акустического тракта прямого ПЭП.

Расчет акустического тракта для отражения от неограниченной донной поверхности [22]:

$$\frac{A_{\text{отр.п}}}{A_0} = R_1 \frac{S_a}{\lambda r} e^{-2\delta r}, \quad (4)$$

где $A_{\text{отр.п}}$ – амплитуда сигнала отраженного от паяного слоя; A_0 – амплитуда сигнала отраженного от первого слоя; R_1 – коэффициент отражения от первого слоя; r – толщина первого слоя; λ – длина волны; S_a – площадь контакта преобразователя (рис. 4, b);

$$\frac{A_{\text{отр.с-в}}}{A_0} = R_2 \frac{S_a}{\lambda r} e^{-2\delta r}, \quad (5)$$

где $A_{\text{отр.с-в}}$ – амплитуда сигнала отраженного от границы сталь – вода; A_0 – амплитуда сигнала отраженного от первого слоя (Me); R_2 – коэффициент отражения от паяного слоя; r – толщина первого слоя (Me); λ – длина волны; S_a – площадь пятна; e – коэффициент затухания (рис. 4, a).

Коэффициент R_2 можно получить как [23]

$$R_2 = \frac{(Z_{\text{в}} - Z_{\text{ст}})^2}{(Z_{\text{в}} + Z_{\text{ст}})^2}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{в}}$ – волновое сопротивление в среде «вода»; $Z_{\text{ст}}$ – волновое сопротивление в среде «сталь».

Коэффициент R можно получить как [24]

$$R = \frac{(Z_1 + Z_2)(Z_2 - Z_3)e^{-i\varphi} + (Z_1 - Z_2)(Z_2 + Z_3)e^{i\varphi}}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)e^{-i\varphi} + (Z_1 - Z_2)(Z_2 - Z_3)e^{i\varphi}}, \quad (7)$$

где Z_1 – волновое сопротивление в среде «сталь» (основание); Z_2 – волновое сопротивление в среде «медь»; Z_3 – волновое сопротивление в среде «твердосплавная сталь».

Фаза плоской волны при распространении через слой

$$\varphi = k_2 b, \quad (8)$$

где k_2 – волновое число; b – толщина паяного слоя.

Коэффициент отражения от слоя меди, рассчитанный по (7), имеет периодическую зави-

симость от произведения частоты ультразвуковой волны и толщины слоя (рис. 8):

$$\frac{A_{\text{отр.п}}}{A_{\text{отр.с-в}}} = \frac{R_1 \frac{S_a}{\lambda r} e^{-2\delta r}}{R_2 \frac{S_a}{\lambda r} e^{-2\delta r}} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (9)$$

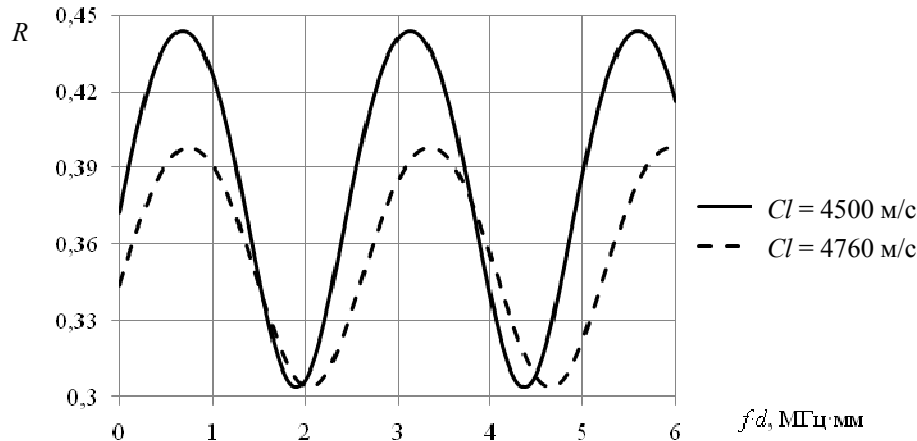


Рис. 8. Коэффициент отражения от паяного медного слоя в сухаре бурового ключа для разных скоростей ультразвука в меди

Fig. 8. Reflectivity of the soldered copper layer in the drill key for different ultrasound velocities in copper

Результаты расчетов для частоты ультразвуковой волны 10 МГц и толщины медного слоя 0,02 и 0,05 мм представлены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты отражения продольной волны при падении на медный слой и расчетное значение амплитуды сигнала

Table 2. Reflection coefficients of a longitudinal wave when incident on a copper layer and the calculated value of the signal amplitude

Параметры	$b = 0,02$ мм		$b = 0,05$ мм	
	R	$U_{\text{отн}}, \text{дБ}$	R	$U_{\text{отн}}, \text{дБ}$
$Cl = 4500$ м/с	0,318	-8,9	0,372	-7,5
$Cl = 4760$ м/с	0,312	-9,0	0,353	-8,0

Расчетные значения $U_{\text{отн}}$, полученные путем моделирования процесса прохождения волны через тонкую медную пленку для $f = 10$ МГц, сравним с отклонением среднего значения от опорного сигнала, полученного экспериментально. Значение отклонения среднего значения от опорного сигнала для $f = 10$ МГц находится в диапазоне -4,1...-7,6 дБ. Значения амплитуд, полученных экспериментально и рассчитанных с помощью модели, близки, что позволяет использовать иммерсионный способ контроля паяных соединений сухарей бурового ключа для

поиска нарушения сплошности пайки на медный припой.

Выводы

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований определен наиболее чувствительный диапазон частот пьезоэлектрических преобразователей для контроля анизотропии плашек буровых замков. Выявлено, что наиболее существенной анизотропией обладают основания плашки, после напайки анизотропия свойств акустических волн существенно снижается. Выявлено, что волна Рэлея более чувствительна к анизотропии, но одним из недостатков использования волны является ее чувствительность к качеству поверхности.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные об амплитуде отраженной акустической волны от тонкой медной пленки паяного соединения при определенной частоте. Расчетные значения, полученные в ходе моделирования, оказались сопоставимы с данными, зафиксированными в экспериментах, что подтверждает эффективность предложенного метода. Это открывает возможности для применения иммерсионного метода для контроля сплошности соединений в плашках буровых ключей.

На образцах с дефектами пайки отмечено значительное увеличение амплитуды отраженного сигнала по сравнению с бездефектными участками. Эти результаты подчеркивают возможность применения предложенного подхода к контролю качества паяных соединений, что крайне важно для повышения надежности и долговечности работы бурового инструмента.

Библиографические ссылки

1. *Горицкий В. М.* Диагностика металлов. М. : Металлургиздат, 2004. 408 с.
2. *Кузьмицкий М. Л., Ксенофонов Н. М.* Оптимизация выбора методов неразрушающего контроля для обнаружения усталостных повреждений элементов механического оборудования // Журнал университета водных коммуникаций. 2012. № 3. С. 6–12. EDN PCREEH
3. Оценка чувствительности к дефектам и исследование скоростей волн в трубах-заготовках цилиндров глубинного штангового насоса волноводным акустическим методом / В. А. Стрижак, Р. Р. Хасанов, А. С. Хомутов [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 3. С. 86–100. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100. EDN PKTDNX
4. Формирование остаточных напряжений в цилиндрах глубинно-штанговых насосов после технологических операций изготовления / В. В. Муравьев, А. С. Хомутов, О. В. Муравьева, Е. А. Степанова, В. Д. Попова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 2. С. 87–96. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. EDN JUTAFX
5. Особенности обнаружения трещин при ультразвуковом контроле сварных соединений стенки резервуара вертикального стального / Н. П. Алешин, Л. Ю. Могильнер, Ю. В. Лисин [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2022. № 1. С. 86–91. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-1-86-91. EDN VPHLXY
6. Метод и аппаратура инфракрасного и ультразвукового термографического контроля крупногабаритных композиционных изделий сложной формы / А. О. Чулков, Д. А. Нестерук, Б. И. Шагдыров, В. П. Вавилов // Дефектоскопия. 2021. № 7. С. 67–74. DOI: 10.31857/S0130308221070083. EDN DFTKXO
7. Ультразвуковой контроль дефектов металлических изделий сложной формы / В. В. Ларионов, А. М. Лидер, Д. О. Долматов, Д. А. Седнев // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 31–36. DOI: 10.31857/S0130308221050043. EDN YUGOFD.
8. *Hirao M., Ogi H., Suzuki N., Ohtani T.* (2000) Ultrasonic attenuation peak during fatigue of polycrystalline copper. *Acta Materialia*, vol. 48, no. 2, pp. 517–524.
9. *Сергеева О. А., Гончар А. В.* Изменение параметра акустической анизотропии в основном металле и зоне термического влияния конструкционной стали при пластическом деформировании и усталостном разрушении // Приборы. 2022. № 6 (264). С. 39–44.
10. *Ерофеев В. И., Иляхинский А. В., Никитина Е. А.* Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22, № 3. С. 65–70. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-13007. EDN BARLMX
11. Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов / Л. В. Волкова, О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, И. В. Булдакова // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10, № 1. С. 42–52. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52. EDN ZAKPZR
12. *Муравьев В. В., Будрин А. Ю., Синцов М. А.* Влияние циклически изменяющихся нагрузок на скорости сдвиговых и рэлеевских волн в стальных прутках разной термической обработки // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 4. С. 4–10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10. EDN RFCNYN
13. *Муравьев В. В., Будрин А. Ю., Синцов М. А.* Структуроскопия термически обработанных стальных прутков по скорости распространения рэлеевских волн // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 2. С. 37–43. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43. EDN VGDDFW
14. *Платунов А. В., Муравьев В. В., Муравьева О. В.* Ультразвуковой контроль поверхности катания железнодорожных вагонных колес и бандажей локомотивов с использованием рэлеевских волн // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 41–48. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-41-48. EDN EOPVSU
15. *Бобров А. Л., Гончаров К. И.* Применение поверхностных ультразвуковых волн для обнаружения контактно-усталостных трещин в поверхности катания // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 3. С. 62–69. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-62-69. EDN XLMMUC
16. *Разыграев Н. П.* Физика, терминология и технология в ультразвуковой дефектоскопии головными волнами // Дефектоскопия. 2020. № 9. С. 3–19. DOI: 10.31857/S0130308220090018. EDN NDUUKO
17. *Mohammad M., Javad J.F.* (2019) Determination of acoustoelastic/acoustoplastic constants to measure stress in elastic/plastic limits by using LCR wave. *NDT and E International*, vol. 104, pp. 69–76. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.04.003
18. *Беляев А. К., Полянский В. А., Третьяков Д. А.* Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 130–151. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.12. EDN WPKYIS
19. *Ремизов А. Л., Дерябин А. А.* Определение размеров дефектов в паяных нахлесточных соединениях // Сварка и диагностика. 2012. № 6. С. 44–46. EDN PKSDSZ
20. Разработка алгоритма движения измерительного модуля установки автоматизированного неразрушающего контроля сопел ЖРД / В. В. Малый, А. С. Костюхин, А. В. Федоров, И. Ю. Кинжагулов //

Дефектоскопия. 2023. № 9. С. 55–57. DOI: 10.31857/S0130308223090063. EDN ECRARN

21. Ультразвуковой контроль паяных соединений топливных коллекторов газотурбинных двигателей / И. С. Краснов, М. А. Далин, Д. С. Ложкова, Е. В. Цветова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 7. С. 36–42. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-7-36-42. EDN PZSNZE

22. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении : монография. Санкт-Петербург : СБЕИ, 2014. 312 с.

23. Wang X., Xu C., Yang F. (2024) Edge blurring suppression of ultrasonic reflection coefficients in contact state measurement. *NDT E International*, vol. 147, p. 103201. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103201

24. Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред. М. : Наука, 1989. 416 с.

References

1. Goritsky V.M. (2004) [Diagnostics of metals]. Moscow: Metallurgizdat Publishing, 408 p. (in Russ.).

2. Kuzmitsky M.L., Ksenofontov N.M. (2012) [Optimization of the choice of the methods of nondestructive testing for the detection of fatigue damage of elements of mechanical equipment]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij*, no. 3, pp. 6-12. EDN PCREEH

3. Strizhak V.A., Khasanov R.R., Khomutov A.S., Torkhov K.A., Pushin P.N. (2024) [Waveguide Acoustic Control of Pipes - Billets of Deep Rod Pumps]. *Vestnik IzhGTU Imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 3, pp. 86-100. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-86-100 EDN PKTDNX (in Russ.).

4. Murav'ev V.V., Khomutov A.S., Murav'eva O.V., Stepanova E.A., Popova V.D. (2024) [Formation of Residual Stresses in the Cylinders of Deep-Rod Pumps after Manufacturing Operations]. *Vestnik IzhGTU Imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 2, pp. 87-96. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-87-96. EDN JUTAFX (in Russ.).

5. Aleshin N.P., Mogilner L.Yu., Lisin Yu.V. (2022) [Characteristic of cracks detection during ultrasonic testing of weld joints of vertical stock tanks' wall]. *Neftegazovoe hozjajstvo*, № 1, pp. 86-91. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-1-86-91. EDN VPHLXY (in Russ.).

6. Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Shagdyrov B.I., Vavilov V.P. (2021) [Method and Equipment for Infrared and Ultrasonic Thermographic Testing of Large-Sized Complex-Shaped Composite Products]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 57, no. 7, pp. 619-626. DOI: 10.1134/S1061830921090114. EDN VFWPVR (in Russ.).

7. Larionov V.V., Lider A.M., Dolmatov D.O., Sednev D.A. (2021) [Ultrasonic Testing for Defects in Complex Shaped Metal Products]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 57, no. 5, pp. 369-374. DOI: 10.1134/S1061830921050090. EDN YIFFAR (in Russ.).

8. Hirao M., Ogi H., Suzuki N., Ohtani T. (2000) Ultrasonic attenuation peak during fatigue of polycrystalline copper. *Acta Materialia*, vol. 48, no. 2, pp. 517-524.

9. Sergeeva O.A., Gonchar A.V. (2022) [Change in the acoustic anisotropy parameter in the base metal and heat-affected zone of structural steel during plastic deformation and fatigue failure]. *Pribory*, no. 6, pp. 39-44 (in Russ.).

10. Erofeev V.I., Malkhanov A.O. (2019) [Dispersion and Self-Modulation of Waves Propagating in a Solid with Dislocations]. *Fizicheskaja mezomehanika*, vol. 22, no. 3, pp. 173-180. DOI: 10.1134/S1029959919030019. EDN DSGSYQ (in Russ.).

11. Volkova L.V., Murav'eva O.V., Murav'ev V.V., Buldakova I.V. (2019) [Device and methods for measuring of acoustic anisotropy and the residual stress in the main gas pipelines' metal]. *Pribory i metody izmerenij*, vol. 10, no. 1, pp. 42-52. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-42-52. EDN ZAKPZR (in Russ.).

12. Muravyov V.V., Budrin A.Yu., Sintsov M.A. (2020) [Influence of High-Cycle Fatigue on the Speed of Shear and Rayleigh Waves in Steel Bars of Different Heat Treatment]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 18, no. 4, pp. 4-10. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-4-10. EDN RFCNYN (in Russ.).

13. Murav'ev V.V., Budrin A.Yu., Sintsov M.A. (2020) [Structuroscopy of Heat-Treated Steel Bars by the Speed of Propagation of Rayleigh Waves]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 18, no. 2, pp. 37-43. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-37-43. EDN VGDDFW (in Russ.).

14. Platunov A.V., Muravev V.V., Muraveva O.V. (2023) [Ultrasonic Thread Surface Inspection of Railroad Car Wheels and Locomotive Tires Using Rayleigh]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 21, no. 2, pp. 41-48. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-41-48. EDN EOPVSU (in Russ.).

15. Bobrov A.L., Goncharov K.I. (2024) [Application of Surface Ultrasonic Waves for Detection of Contact Fatigue Cracks in the Rail Surface]. *Vestnik IzhGTU Imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 3, pp. 62-69. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-62-69. EDN XLMMUC (in Russ.).

16. Razygraev N.P. (2020) [Physics, terminology and technology in ultrasonic testing with head waves]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, № 9, pp. 3-19. DOI: 10.31857/S0130308220090018. EDN NDUUKO (in Russ.).

17. Mohammad M., Javad J.F. (2019) Determination of acoustoelastic/acoustoplastic constants to measure stress in elastic/plastic limits by using LCR wave. *NDT and E International*, vol. 104, pp. 69-76. DOI: 10.1016/j.ndteint.2019.04.003

18. Belyaev A.K., Polyansky V.A., Tretyakov D.A. (2020) [Estimating of mechanical stresses, plastic deformations and damage by means of acoustic anisotropy]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mekhanika*, no. 4, pp. 130-151. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.12. EDN WPKYIS (in Russ.).

19. Remizov A.L., Deryabin A.A. (2012) [Determination of defect sizes in soldered lap joints]. *Svarka i diagnostika*, no. 6, pp. 44-46. EDN PKSDSZ (in Russ.).

20. Malyy V.V., Kustukihin A.S., Fedorov A.V., Kinzhagulov I.Yu. (2023) [Development of the algorithm for the movement of the measuring module of the system of automated non-destructive testing of the nozzle of a lpre]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 9, pp. 55-57. DOI: 10.31857/S0130308223090063. EDN ECRARN (in Russ.).

21. Krasnov I.S., Dalin M.A., Lozhkova D.S., Tsvetova E.V. (20220) [Ultrasonic testing of soldered joints in fuel manifolds of gas turbine engines]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, vol. 88, no. 7, pp. 36-42.

DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-7-36-42. EDN PZSNZE (in Russ.).

22. Kretov E.F. (2014) [Ultrasonic flaw detection in power engineering]. St. Petersburg: SVEN Publishing, 312 p. (in Russ.).

23. Wang X., Xu C., Yang F. (2024) Edge blurring suppression of ultrasonic reflection coefficients in contact state measurement. *NDT E International*, vol. 147, p. 103201. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103201

24. Brekhovskikh L.M., Godin O.A. (1989) [Acoustics of layered media]. Moscow: Nauka Publishing, 416 p. (in Russ.).

Evaluation of Ultrasonic Testing Parameters of Drill Key Die Soldered Joints

L.V. Volkova, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.V. Platunov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

D.A. Petrov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Drill key dies are elements of drilling equipment used to ensure reliable grip during installation and dismantling of drill pipes. High loads and aggressive operating conditions set quality control requirements of these elements. Timely diagnostics of fatigue damage and deformations at early stages, as well as the application of non-destructive methods, help minimize the risk of accidents and increase the service life of drilling equipment. The work is aimed at determining the optimal parameters of ultrasonic waves for assessing the acoustic anisotropy of drill key dies, taking into account the quality control of soldered joints. The article presents the results of studies on assessing acoustic anisotropy and searching for continuity defects in drill key dies, allowing determination of the optimal parameters of ultrasonic waves for quality control of die soldered joints. Acoustic anisotropy was assessed by means of two wavetypes: the head wave and the Rayleigh wave. The study included the analysis of various frequency ranges in order to identify maximum sensitivity to the anisotropic state of the samples. Ultrasonic testing of soldered joints quality was performed both without and with a standard sample, allowing the estimation of the amplitude spread of signals reflected from the soldered joint. To improve testing accuracy, the immersion method was chosen eliminating the influence of surface contact on quality. Testing was performed on 12 samples, each of which was checked at 8-9 points using a DIO1000 PA ultrasonic flaw detector and a P112-10 transducer. The average value of the signal amplitude from the free boundary of the sample served as the reference value. During the experiments, the most sensitive frequency range of piezoelectric transducers for testing the anisotropy of drill lock dies was determined. It was found that the die bases have significant anisotropy, which decreases after soldering. The obtained data on the amplitude of the acoustic wave reflected from the copper film coincide with the calculated values, confirming the efficiency of the immersion method for testing the continuity of joints. It was found that in areas with soldering defects, the amplitude of the reflected signal increases significantly compared to defect-free areas, which provides prospects for increasing the reliability and durability of the drilling tool.

Keywords: drill key dies, head wave, Rayleigh wave, anisotropy, ultrasonic testing, soldered joint.

Получено 10.02.2025

Образец цитирования

Волкова Л. В., Платунов А. В., Петров Д. А. Оценка параметров ультразвукового контроля паяных соединений плашек буровых ключей // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 1. С. 67–78. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-67-78

For Citation

Volkova L.V., Platunov A.V., Petrov D.A. (2025) [Evaluation of Ultrasonic Testing Parameters of Drill Key Die Soldered Joints]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 1, pp. 67-78 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2025-1-67-78