

ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ РОТАЦИОННОЙ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

© 2025 г. Н.А. Щипаков^{1,2,*}, В.В. Тишкин^{1,2,**}, Е.А. Кудрявцев^{3,***}, Т.Т. Фозилов^{1,3,4,****}

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

²ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», Россия 105005 Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

³Филиал АО «ОДК» «НИИД», Россия 105118 Москва, пр-т Будённого, 16, корп. 2

⁴МАИ, Россия 125993 Москва, Волоколамское шоссе, 4

E-mail: *shchipak@bmstu.ru; **vtishkin@gmail.com; ***e.kudryavcev@uecrus.com;

****fozbourbe@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.09.2024; после доработки 15.10.2024

Принята к публикации 15.10.2024

Проанализирована конструкция заготовок ротора из жаропрочных никелевых сплавов, сваренных перспективным способом — ротационной сваркой трением. Продемонстрированы наиболее характерные типы дефектов, возникновение которых возможно при данном способе сварки, и их преимущественная ориентация. Для выявления таких дефектов предложена схема дифракционного метода контроля. Показана ее применимость на образце с искусственными и естественным дефектами.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, ультразвуковой контроль, дефект, дифракционный метод, дельта-метод, горячее изостатическое прессование.

DIFFRACTION METHOD OF CONTROL OF WELDED JOINTS MADE BY FRICTION STIR WELDING

© 2025 N.A. Shchipakov^{1,*}, V.V. Tishkin^{1,2,**}, E.A. Kudriavtsev^{3,***}, T.T. Fozilov^{1,3,4,****}

¹Bauman Moscow State Technical University, Russia 105005 Moscow, 2ya -Baumanskaya st., 5, s.1

²Welding and Testing of BMSTU, Russia 105005 Moscow, 2ya -Baumanskaya st., 5, s.1

³Filial AO «ODK» «NIID», Russia 105118 Moscow, Budenogo av., 16, k. 2

⁴MAI, Russia 125993 Moscow, Volokolamskoe sh., 4

E-mail: *shchipak@bmstu.ru; **vtishkin@gmail.com; ***e.kudryavcev@uecrus.com;

****fozbourbe@yandex.ru

The design of rotor blanks made of heat-resistant nickel alloys welded by a promising method — friction stir welding — has been analysed. The most characteristic types of defects, the occurrence of which is possible at this welding method, and their preferential orientation are demonstrated. For detection of such defects the scheme of diffraction method of control is offered. Its applicability on the sample with artificial and natural defects is shown.

Keywords: friction stir welding, ultrasonic inspection, defect, diffraction method, delta method, hot isostatic pressing.

DOI: 10.31857/S0130308225010016

ВВЕДЕНИЕ

Различные детали современных двигателей работают в достаточно тяжелых условиях, таких как высокая температура, большие давления, нагрузки и т.д. Для обеспечения длительной службы как этих деталей, так и различных машин, в которых используются эти детали, разумным является использование сложносоставных сплавов, например жаропрочных никелевых. В отличие от легированных сталей, эти сплавы обладают уникальными характеристиками, которые позволяют обеспечить длительную работоспособность двигателей в таких тяжелых условиях. Но такие сплавы, как правило, отличаются ограниченной или низкой свариваемостью, особенно это касается сплавов, получаемых методами порошковой металлургии, к которым невозможно применить традиционные методы сварки плавлением в виду разрушения межзеренных и межгранульных связей ввиду красноломкости [1]. Для преодоления этих трудностей активно используется ротационная сварка трением (РСТ). Процесс РСТ — это процесс сварки в твердой фазе без расплавления металла [2, 3]. Как правило, один сварной элемент вращается относительно другого, и за счет трения происходит выделение тепла. Далее вращающаяся заготовка прижимается осевой силой и происходит выдавливание лишнего металла из области свар-

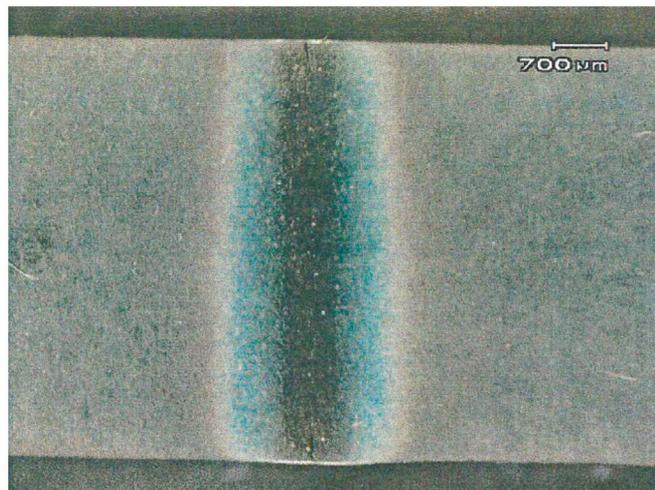
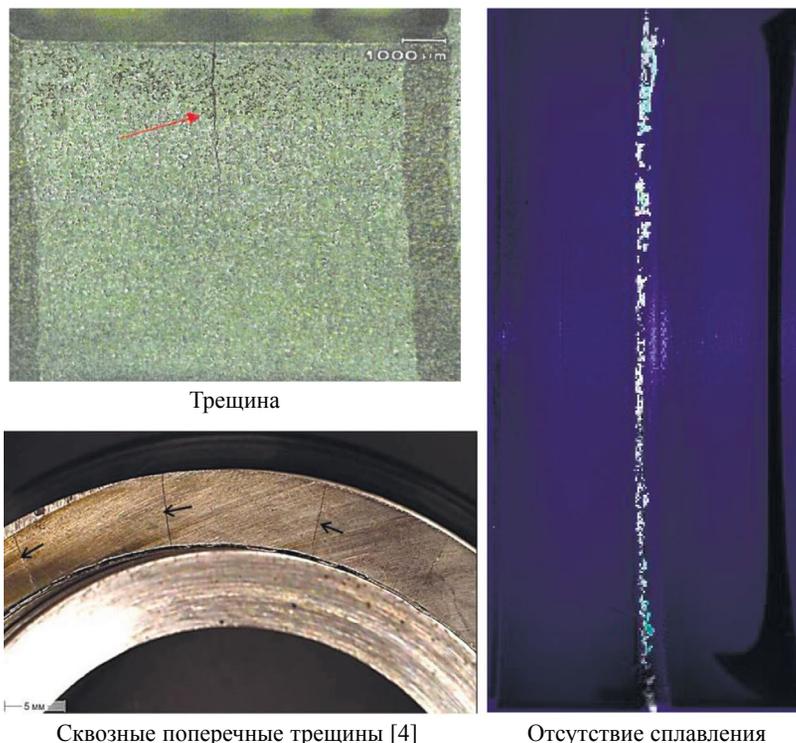


Рис. 1. Травленный макрошлиф сварного соединения сплава ВВ751П, полученный РСТ.

ки, образуется так называемый грат. После чего грат механическим путем удаляется. Сварное соединение представляет собой тонкую линию шириной порядка 1-2 мм (см. рис. 1).

В процессе сварки РСТ возможно образование специфических дефектов, характерных именно для данного способа. Как и в других методах прессовой сварки, при сварке трением могут возникать в основном плоскостные дефекты с минимальным раскрытием, ориентированные в сварном соединении строго вертикально. Такими дефектами являются трещины, выходящие на внешнюю или внутреннюю поверхности, отсутствие сплавления, сквозные поперечные трещины. Типичные дефекты приведены на рис. 2. При этом на всех участках сварного соединения отсутствуют дефекты структуры, характерные для сварки плавлением [4].

Примером детали из жаропрочного никелевого сплава, подлежащей сварке РСТ, является заготовки перспективных роторов. Заготовки под сварку ротора изготавливаются методом горячего изостатического прессования (ГИП) [5]. Для этого металлический порошок необходимого



Трещина

Сквозные поперечные трещины [4]

Отсутствие сплавления

Рис. 2. Типовые дефекты сварного соединения жаропрочного никелевого сплава.

состава загружают в специальную оболочку и откачивают воздух, нагревают до температуры, не превышающей точки солидуса конкретного сплава, и далее определенное время выдерживают под давлением. Этот метод позволяет получить химическую однородность сплава по всему объему детали, а также деталь или заготовку формой, близкой к форме изделия, что увеличивает коэффициент использования материала. Это особенно актуально для жаропрочных сплавов, которые активно применяются в авиапромышленности.

Во время производства заготовок из-за технологических особенностей горячего изостатического прессования может возникать пористость внутри заготовок. Она вызвана недостаточным давлением при спекании порошка, может быть равномерно распределена во всем объеме изготавливаемой заготовки и даже выходить на поверхность или попадать в зону сварки. В последствии это может привести к образованию дефектов непосредственно в сварном шве.

В настоящее время для контроля таких заготовок применяются капиллярные методы проникающими веществами и рентгенографические методы. При контроле проникающими веществами выявляются только дефекты, выходящие на поверхность. Дефекты, находящиеся в толще сварного соединения и основного металла, останутся невыявленными, что является главным недостатком данного метода. При контроле радиографическим методом плоскостные дефекты выявляются только в том случае, если плоскость их раскрытия совпадает с плоскостью распространения рентгеновского излучения. Невыполнение данного условия может привести к пропуску такого дефекта. Так же стоит отметить, что жаропрочные сплавы, как правило, имеют высокую плотность, что в совокупности с большой радиационной толщиной в конечном счете не позволяет обеспечить высокую чувствительность контроля. Наряду с этим существует специфическая сложность, относящаяся к конкретной разновидности сварки, так как размеры трещин могут быть менее 100 мкм и являться очаговой зоной разрушения в ходе проведения дальнейших технологических операций.

Для решения данной задачи выявления вертикально ориентированных дефектов с минимальным раскрытием в узких сварных соединениях, выполненных ротационной сваркой трением, могут быть применены ультразвуковые методы неразрушающего контроля, которые позволяют с высокой чувствительностью выявлять различные дефекты как выходящие на поверхность, так и скрытые в толще металла, особенно хорошо ультразвуковыми методами выявляются плоскостные дефекты. Кроме того, к преимуществам ультразвуковых методов контроля стоит отнести низкую стоимость оборудования и отсутствие вредных факторов по сравнению с рентгеновскими методами контроля, а также низкая стоимость расходных материалов по сравнению с капиллярными методами контроля. К достоинствам также следует отнести высокую скорость контроля.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ

Объектом контроля являются сваренные ротационной сваркой трением две заготовки периферического ротора, выполненные из жаропрочного никелевого сплава. Заготовки представляют собой тела вращения со ступенчатым сечением. Внешний вид сектора заготовки представлен на рис. 3, чертеж сечения представлен на рис. 4. После сварки производится удаление грата с наружной и внутренней сторон.



Рис. 3. Сегмент заготовки ротора.

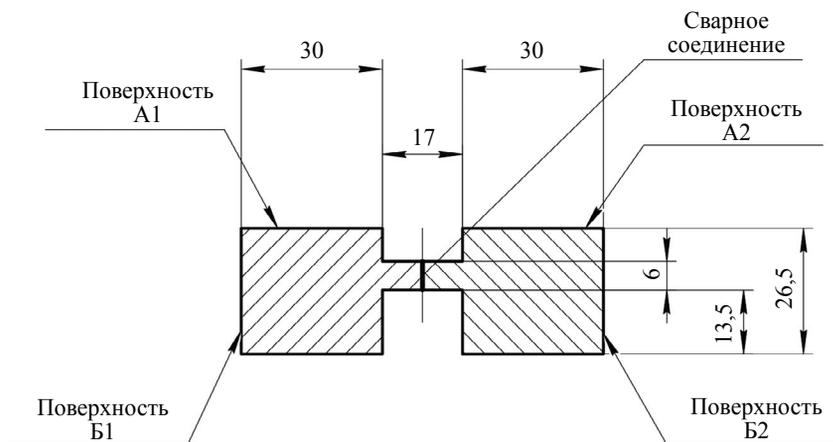


Рис. 4. Чертеж сечения сваренной заготовки.

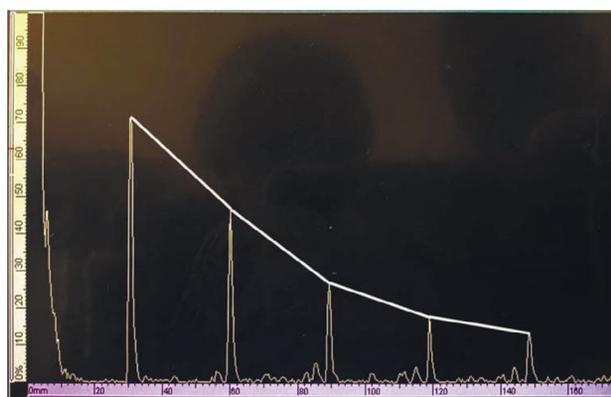


Рис. 5. А-скан донных сигналов.

В первую очередь были определены акустические характеристики материала. Для определения скорости звука преобразователь устанавливался на поверхность В1 таким образом, чтобы ультразвуковая волна проходила расстояние 30 мм, отражалась от поверхности донной поверхности и возвращалась обратно в преобразователь. По прошедшему времени вычислялась скорость звука. Скорость продольных волн составила 5960 м/с, а поперечных — 3190 м/с. Погрешность определения скорости не превышала 1 %. В основном материале объекта контроля не было замечено анизотропии скорости звука. Разница скоростей продольных волн, распространяющихся во взаимно перпендикулярных направлениях, не превысила 1 %. Разница скоростей поперечных волн со взаимно перпендикулярной поляризацией также не превысила 1 %.

Оценка затухания производилась косвенным образом. Для этого преобразователь также устанавливался на поверхность В1. На экране дефектоскопа на фоне шумов отчетливо различались не менее пяти донных эхосигналов. А-скан представлен на рис. 5.

ВЫБОР СХЕМЫ КОНТРОЛЯ

Исходя из геометрии сварного соединения, а также того, что потенциальные плоскостные дефекты ориентированы строго вертикально и могут не выходить на поверхность, то применение эхо-импульсного метода как прямым преобразователем, расположенным непосредственно над сварным соединением, так и наклонным преобразователем при контроле с поверхностями В1 и В2 (см. рис. 4), не гарантируют выявление наиболее характерных и опасных типов дефектов ротационной сварки трением.

Мог бы быть применен эхо-импульсный метод прямым совмещенным преобразователем продольных волн с поверхностями В1 или В2, однако при ротационной сварке трением возможно образование дефектов аналогично дефектам, характерным для контактной стыковой сварки оплавлением, с частичной металлической связью [6, 7]. Такие дефекты являются акустически

прозрачными [8, 9], а эхосигнал от таких дефектов невелик. Кроме того, эхосигнал от возможных дефектов может маскироваться эхосигналами от конструктивных элементов проточки. В данной работе предлагается рассмотреть возможности дифракционных методов ультразвукового контроля таких сварных соединений.

Существуют работы, где описывается применимость ультразвуковых методов для контроля переходников для труб, сваренных РСТ, в частности дифракционно-временной (ДВМ) [10] метод, известный за рубежом как TOFD, который хорошо выявляет вертикально ориентированные дефекты. Схема контроля ДВМ представлена на рис. 6а.

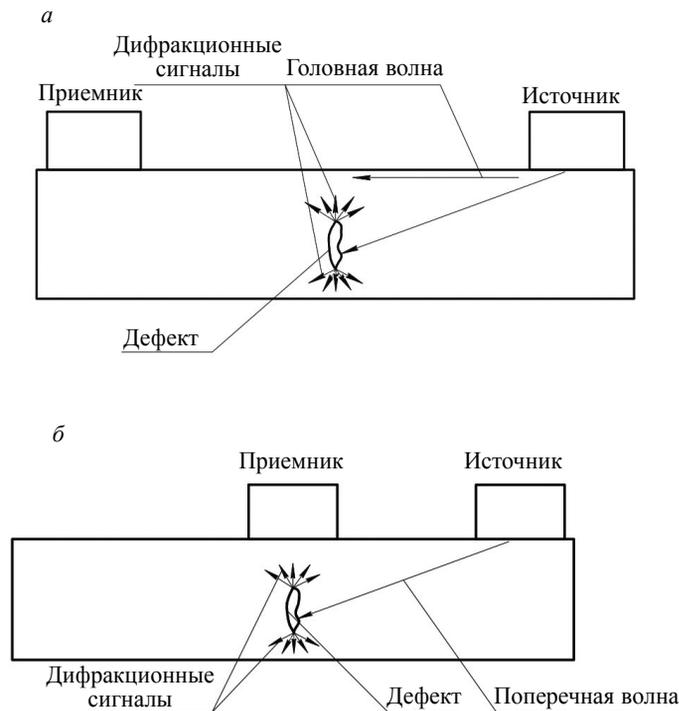


Рис. 6. Схема контроля ДВМ (а) и дельта-методом (б).

При реализации ДВМ используется два преобразователя, один из которых является источником ультразвуковых колебаний, а второй — приемником. Источник возбуждает продольные ультразвуковые волны, распространяющиеся в объекте контроля широким фронтом, озвучивая сечение сварного соединения. При этом на экране дефектоскопа будут видны сигналы от головной волны и так называемые «донные сигналы». В случае наличия дефекта в сварном шве его края становятся источниками дифрагированных волн, которые улавливает второй преобразователь. А-скан дефектоскопа показан при рис. 7.

Критерием наличия дефекта является появление сигналов в области между головной волной и отраженным донным сигналом.

Еще одним вариантом дифракционного контроля, который можно было бы использовать для контроля данного типа сварки, является дельта-метод. Дельта-метод также позволяет выявлять вертикально ориентированные дефекты. В нем так же, как и в методе ДВМ, используется пара преобразователей, один является источником поперечных колебаний и располагается в стороне от зоны контроля, а второй — приемником продольных УЗ волн и располагается непосредственно над зоной контроля. Дефект здесь также будет являться источником дифрагированных волн, сигнал от которых фиксируется приемником (рис. 6б).

Однако использование вышеперечисленных дифракционных методов (ДВМ и дельта) для контроля заготовки ротора не представляется оптимальным из-за особенностей геометрии сечения сварного соединения. Во-первых, ввиду того, что само сварное соединение находится в проточке, а возбуждение колебаний будет проводиться с поверхностями А1 и А2 (см. рис. 4), то будут трудности с озвучиванием области сверху сварного соединения, и дефекты, находящиеся там, могут быть пропущены. Во-вторых, в случае попытки применения метода ДВМ для исследуемого объекта...

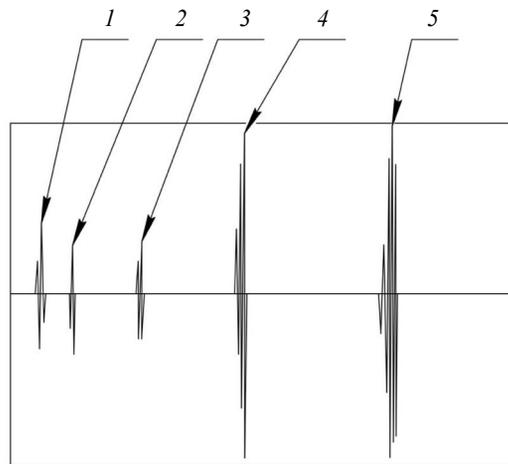


Рис. 7. А-скан дефектоскопа при реализации ДВМ: 1 — сигнал от головной волны; 2 — сигнал от верхней грани дефекта; 3 — сигнал от нижней грани дефекта; 4 — сигнал от продольной волны, отраженный от дна; 5 — сигнал от донной трансформированной волны.

дуемого объекта контроля из-за того, что сварное соединение располагается в проточке, на А-скане будет отсутствовать сигнал от головной волны.

Учитывая геометрические особенности подлежащего контролю сварного соединения, предлагается использовать дифракционный метод контроля, где в качестве источника УЗ колебаний будет применяться прямой преобразователь с вводом ультразвуковых волн с поверхности Б1 или Б2, а прием дифрагированных колебаний будет осуществляться (как в дельта-методе) прямым преобразователем, установленным непосредственно на сварное соединение. Схема предлагаемого контроля представлена на рис. 8.

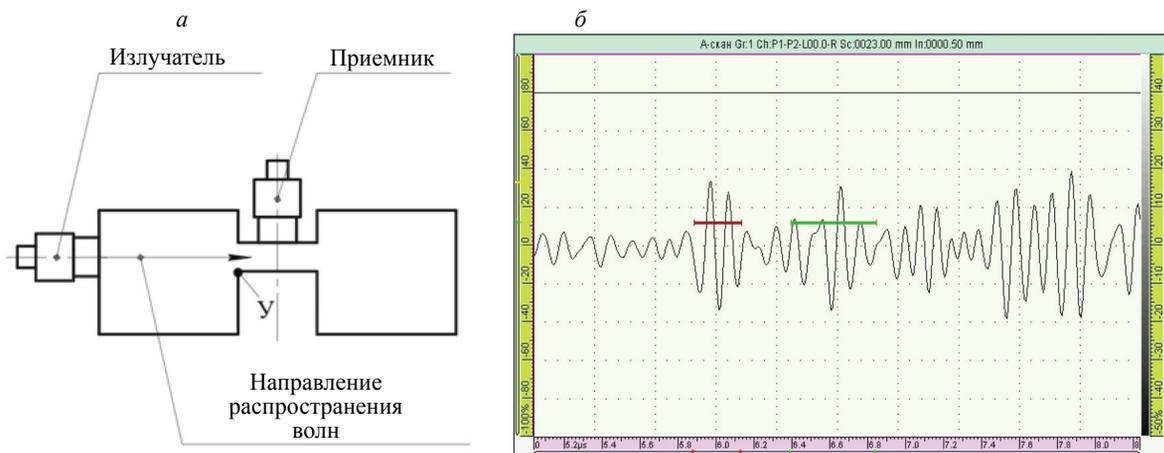


Рис. 8. Предлагаемая схема контроля дифракционным методом и характерный ей А-скан в бездефектной зоне.

При данной схеме контроля предлагается озвучивать сечение сварного соединения продольными волнами. Такое расположение излучателя позволяет озвучить весь объем сварного соединения. В случае наличия дефектов в сварном соединении на них будет падать продольная волна, и они станут источниками дифрагированных волн, которые будут приниматься приемником. В бездефектной зоне постоянно присутствуют не менее двух сигналов: первым приходит сигнал, распространяющийся от источника до приемника по наикратчайшему пути со скоростью продольной волны (рис. 8б, сигнал в красном стробе), а второй сигнал, представленный на рис. 8б в зеленом стробе, это сигнал от угла проточки У. Время прихода второго сигнала соответствует времени распространения продольной волны на пути от источника до угла проточки У и от угла

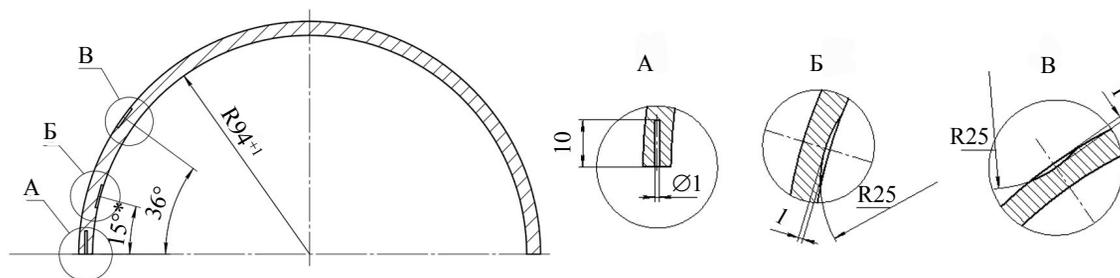


Рис. 9. Расположение искусственных дефектов на образце.

проточки до приемника. Эти сигналы полезны как для выставления зоны контроля, так и для отслеживания акустического контакта в процессе проведения сканирования.

Для проверки работоспособности выбранной схемы контроля на образцы сварных соединений были нанесены искусственные отражатели двух типов: боковое цилиндрическое отверстие (БЦО) и пропилы (см. рис. 9). БЦО было выполнено сверлом с диаметром 1 мм в торце образца на глубину 10 мм. БЦО предназначалось для настройки зоны контроля, а также для проверки возможности выявлять предлагаемым методом дефекты внутри сварного соединения, которые не выходят на его поверхность.

Так же были изготовлены два пропила длиной 10 мм и глубиной 1 мм: пропилы в верхней и нижней частях сварного шва, которые предназначались для проверки выявляемости дефектов, выходящих на поверхность. Пропилы были выполнены дисковой фрезой шириной 1 мм. Внешний вид изготовленных БЦО и пропила на внутренней поверхности представлены на рис. 10.

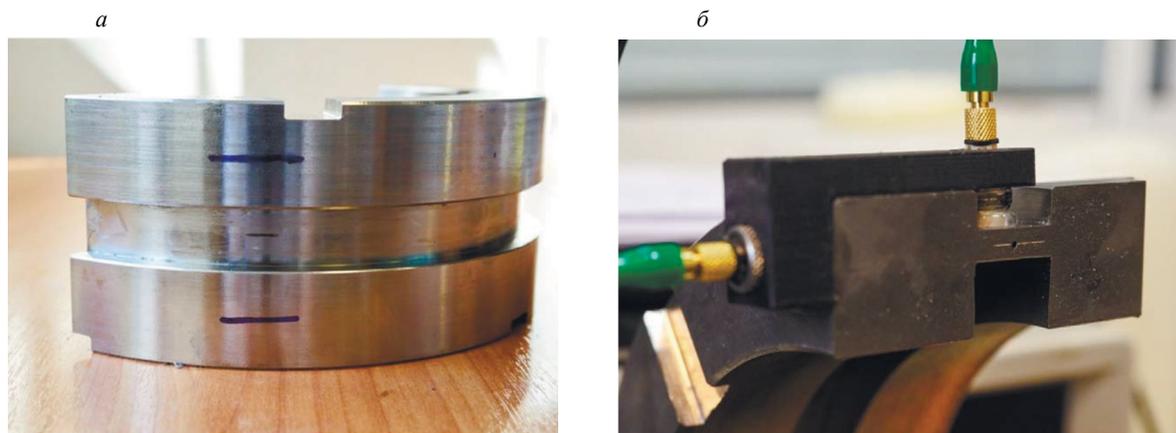


Рис. 10. Внешний вид искусственных дефектов: БЦО (а) и пропила (б).

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОПИСАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выбора оптимального возбуждающего преобразователя нами были рассчитаны акустические поля для четырех диаметров пьезопластин: 3, 6, 8 и 12 мм (см. рис. 11). Как видно из карт амплитуд, построенных в программном комплексе CIVIA, оптимальным диаметром пьезопластины был бы диаметр 8 мм, т.к. максимум амплитуды приходился бы как раз на зону сварного соединения, удаленную на 38,5 мм от точки ввода (горизонтальная черная линия). Однако стандартные прямые совмещенные датчики с частотой 10 МГц и диаметром пьезопластины 8 мм на отечественном рынке не представлены. Для ПЭП с диаметром пластины 12 мм длина ближней зоны составит 61 мм. Наиболее близким к оптимальному является ПЭП с диаметром 6 мм. Именно он и был выбран для проведения экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились на дефектоскопе OmniScan MX фирмы Olympus.

Во время проведения экспериментальных исследований преобразователи устанавливались в специальную оснастку (рис. 10б), которая позволяла обеспечить взаимное их положение

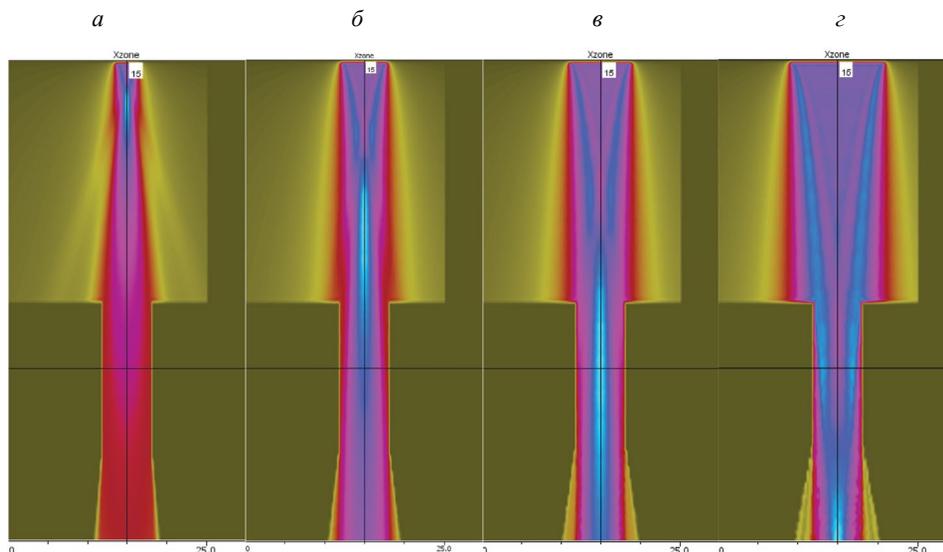


Рис. 11. Результаты моделирования карты амплитуд от преобразователей на частоту 10 МГц с диаметрами: 3 мм (а); 6 мм (б); 8 мм (в); 12 мм (г).

таким образом, чтобы акустические оси преобразователей пересекались, и они располагались в одном сечении образца. К оснастке прикреплялся энкодер для отслеживания и записи координаты вдоль шва. Во время сканирования оснастка с преобразователями перемещалась вдоль сварного соединения, осуществлялась запись данных контроля в В-сканы. При выявлении сигнала от БЦО усиление дефектоскопа подстраивалась таким образом, чтобы амплитуда сигнала от БЦО составляла примерно 80 процентов высоты экрана дефектоскопа. Полученный скан с сигналом от БЦО представлен на рис. 12, где цифрой 2 обозначена область с БЦО, а цифрой 1 — бездефектная область сварного соединения. Отношение сигнал/шум при выявлении БЦО составило 26 дБ. В-скан, полученный при сканировании зоны с пропилами, выполненными на внешней (1) и внутренней (2) поверхностях образца, представлен на рис. 13. Отношение сигнал/шум для пропила, расположенного на внешней поверхности, составило 12 дБ, а для пропила, расположенного на внутренней стороне, — 18 дБ.

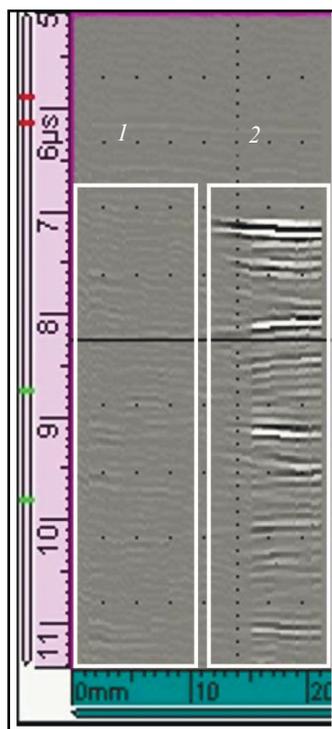


Рис. 12. В-скан образца с БЦО, где область 1 показывает бездефектную зону, а область 2 — зону с БЦО.

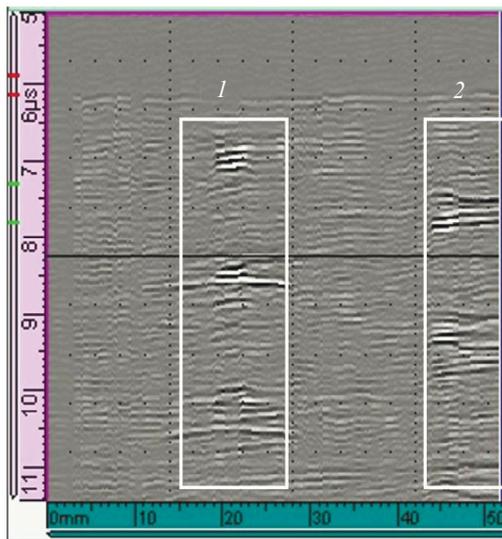


Рис. 13. В-скан образца с пропилами, где область 1 показывает зону с пропилом с внешней стороны образца, а область 2 — зону с пропилом с внутренней стороны образца.

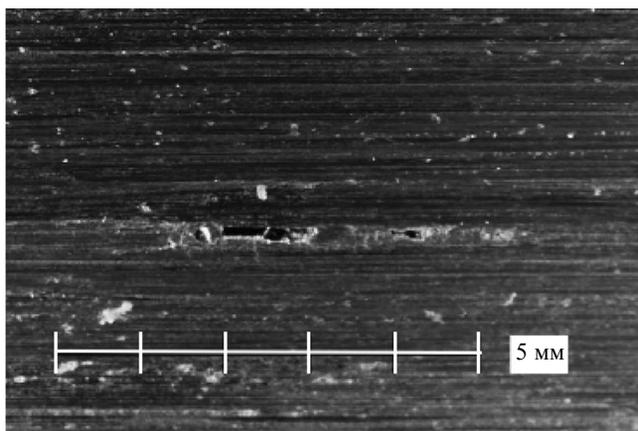


Рис. 14. Несплавление, выходящее на поверхность исследуемого образца.

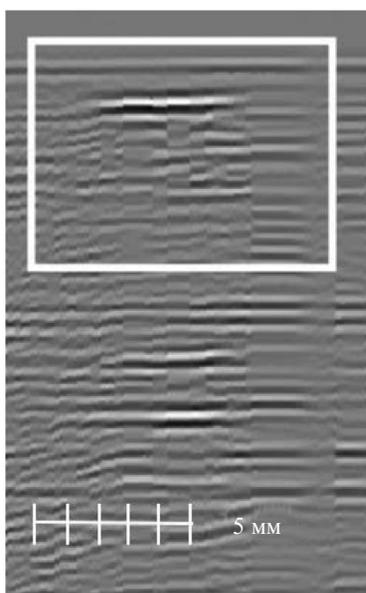


Рис. 15. В-скан участка шва с естественным дефектом, область с дефектом выделена рамкой.

Помимо искусственных дефектов в нашем образце имелся один естественный дефект — несплавление, выходящее на внешнюю поверхность сварного соединения. Данное несплавление было случайно получено в процессе отработки режимов сварки. Внешний вид несплавления показан на рис. 14. При сканировании по предложенной нами схеме контроля в зоне с данным естественным дефектом был получен В-скан, показанный на рис. 15. На В-скане однозначно можно обнаружить сигнал от естественного дефекта, выходящего на внешнюю поверхность образца. Максимальное отношение сигнал/шум составило 8 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что при использовании предложенной схемы дифракционного контроля с озвучиванием зоны сварного соединения продольными волнами прямым преобразователем, установленным на торцевую поверхность заготовки, а приемом прямым преобразователем с поверхности непосредственно над сварным соединением, могут быть выявлены как внутренние, так и выходящие на поверхность дефекты ротационной сварки трением изделия из жаропрочного никелевого сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их переработки / Материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 15 нояб. 2018 г.). [Электронный ресурс]. ФГУП «ВИАМ». М.: ВИАМ, 2018. 167 с.: ил. ISBN 978- 5-905217-34-0.
2. Гурьев А.В., Фозилов Т.Т., Минахметов А.А. Технология ротационной сварки трением жаропрочных гранулируемых никелевых сплавов / Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова. Самара. 21—23 июня 2023 г. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Т. 1. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. С. 349—350. EDN DPCQNS.
3. Зубков Д.В., Трушов В.А., Приймак Е.Ю. Механические испытания и контроль качества сварных соединений из среднеуглеродистых легированных сталей, полученных ротационной сваркой трением / Физическое материаловедение: сборник материалов XI международной школы. Тольятти. 11—15 сентября 2023 года. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2023. С. 157—158. EDN DZYATU.
4. Заводов С.А., Поляков А.Н., Павлов Л.А., Шатунский А.А. Разработка технологии ротационной сварки трением для изготовления детали «ротатор» // Вестник РГТА имени П. А. Соловьева. 2023. № 2 (65). С. 126—131. EDN FVIJAO.
5. Агеев С.В., Гиршов В.Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии // Металлообработка. 2015. № 4 (88). С. 56—60. EDN VCFSDF.
6. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Козлов Д.М., Крысько Н.В., Бритвин В.А. Контроль качества сварных соединений трубопроводов малого диаметра, выполненных контактной сваркой оплавлением / Газотранспортные системы: настоящее и будущее (GTS-2017). Тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции. П. Развилка. 26—27 октября 2017 года. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ», 2017. С. 99. EDN LEIWKQ.
7. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Козлов Д.М., Крысько Н.В., Попович А.Л. Неразрушающий контроль качества сварных соединений трубопроводов, выполненных контактной сваркой оплавлением // Территория Нефтегаз. 2015. № 11. С. 44—48. EDN VOKXKV.
8. Алешин Н.П., Бакшаев В.А., Григорьев М.В., Щипаков Н.А., Бровко В.В., Тишкин В.В. Исследования дифракционных методов ультразвукового контроля применительно к выявлению искусственных дефектов, имитирующих раздробленные окисные пленки в шве, выполненном сваркой трением с перемешиванием // Материаловедение. 2021. № 1. С. 17—23. EDN IFSKGN.
9. Delrue S., Tabatabaeipour M., Hettler J., Van Den Abeele K. Applying a nonlinear, pitch-catch, ultrasonic technique for the detection of kissing bonds in friction stir welds // Ultrasonics. 2016 May. V. 68. P. 71—9. DOI: 10.1016/j.ultras.2016.02.012. Epub 2016 Feb 21. PMID: 26921559.
10. Бровко В.В., Кусый А.Г., Павлов Л.А., Хоменко В.И. Применение ротационной сварки трением для изготовления переходников с трубной стали на нержавеющую сталь аустенитного класса / Состояние и основные направления развития сварочного производства ПАО «ГАЗПРОМ»: Тезисы докладов. VIII Отраслевое совещание. Москва, 14—18 ноября 2016 года. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ», 2016. С. 29. EDN TSGJQF.

REFERENCES

1. Perspective heat-resistant nickel deformable alloys and technologies of their processing: materials of the All-Russian scientific and technical conference (Moscow, 15 November 2018). [Electronic resource] / FSUE «VIAM». M.: VIAM, 2018. 167 p.: ill. ISBN 978- 5-905217-34-0.
2. *Guriev A.V., Fozilov T.T., Miniakhmetov A.A.* Technology of rotary friction welding of heat-resistant granulated nickel alloys / Prospects for the development of engine building: proceedings of the International Scientific and Technical Conference named after N.D. Kuznetsov, Samara, 21-23 June 2023 / Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev. V. 1. Samara: Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, 2023. P. 349—350. EDN DPCQNS
3. *Zubkov D.V., Trushov V.A., Priymak E.Yu.* Mechanical testing and quality control of welded joints made of medium carbon alloy steels obtained by friction stir welding / Physical Materials Science: Collection Of Materials of the XI International School, Togliatti, 11—15 September 2023. Togliatti: Togliatti State University, 2023. P. 157—158. EDN DZYATU.
4. *Zavodov S.A., Polyakov A.N., Pavlov L.A., Shatul'skiy A.A.* Development of friction stir welding technology for manufacturing of «rotor» part / Bulletin of P. A. Solovyov Russian State Automobile Technical Academy named after P. A. Solovyov. 2023. No. 2 (65). P. 126—131. EDN FVIJAO.
5. *Ageev S.V., Girshov V.L.* Hot isostatic pressing in powder metallurgy // *Metalloobrabotka*. 2015. No. 4 (88). P. 56—60. EDN VCFSDF.
6. *Alyoshin N.P., Grigoriev M.V., Kozlov D.M., Krysko N.V., Britvin V.A.* Quality control of welded joints of small-diameter pipelines made by contact fusion welding / Gas Transmission Systems: present and future (GTS-2017) : Abstracts of VII International Scientific and Technical Conference, Razvilka, 26-27 October 2017. Moscow: Limited Liability Company «Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies — Gazprom VNIIGAZ», 2017. C. 99. EDN LEIWKQ.
7. *Alyoshin N.P., Grigoriev M.V., Kozlov D.M., Krysko N.V., Popovich A.L.* Non-destructive quality control of pipeline welded joints made by contact fusion welding // *Territory Neftegaz*. 2015. No. 11. P. 44—48. EDN VOKXKV.
8. *Aleshin N.P., Bakshaev V.A., Grigoriev M.V., Shchipakov N.A., Brovko V.V., Tishkin V.V.* Investigations of diffraction methods of ultrasonic control as applied to detection of artificial defects imitating fragmented oxide films in a weld made by friction stir welding // *Materials Science*. 2021. No. 1. P. 17—23. EDN IFSKGN.
9. *Delrue S., Tabatabaeipour M., Hettler J., Van Den Abeele K.* Applying a nonlinear, pitch-catch, ultrasonic technique for the detection of kissing bonds in friction stir welds // *Ultrasonics*. 2016 May. V. 68. P. 71—9. DOI: 10.1016/j.ultras.2016.02.012. Epub 2016 Feb 21. PMID: 26921559.
10. *Brovko V.V., Kusyy A.G., Pavlov L.A., Khomenko V.I.* Application of friction stir welding for manufacturing of adapters from pipe steel to austenitic class stainless steel / State and main directions of development of welding production of PJSC GAZPROM : Abstracts of Reports Theses of reports. VIII Industry meeting, Moscow, 14—18 November 2016. Moscow: Limited Liability Company «Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies — Gazprom VNIIGAZ», 2016. P. 29. EDN TSGJQF.