

УДК 620.179.16

Оценка чувствительности дифракционно-временного метода ультразвукового контроля

Л.Ю. Могильнер^{1,2}, Н.А. Щипаков^{1,2}, С.В. Гуркин¹,
Л.П. Фомина¹, А.В. Ворыханов¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² ФГАУ «НУЦ СК при МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Sensitivity assessment of the time-of-flight diffraction method of ultrasonic testing

L.Yu. Mogilner^{1,2}, N.A. Shchipakov^{1,2}, S.V. Gurkin¹,
L.P. Fomina¹, A.V. Vorykhanov¹

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Welding and Testing of BMSTU

Рассмотрен пример, показывающий возможность выявлять методами ультразвукового контроля дефекты, размер которых не превышает длину волны. В сварном соединении стальных деталей, выполненном контактной стыковой сваркой оплавлением, дифракционно-временным методом (TOFD) с использованием продольной волны на частоте 5 МГц, т. е. при длине волны около 1,2 мм, выявлен одиночный точечный дефект. Его наличие в сварном шве подтверждено с применением фазированных решеток. По результатам металлографического анализа определен тип дефекта — шлаковое включение округлой формы с гладкими краями и размером около 1 мм. Показано, что в исследованном сварном шве в области сплавления также имеются локальные зоны с укрупненным зерном и равномерно распределенные случайным образом мелкие неметаллические включения со средним размером до 0,1 мм. Однако при ультразвуковом контроле эти структуры создавали лишь фоновый шум и не препятствовали обнаружению шлакового включения. Полученные данные подтвердили необходимую чувствительность (около 1 мм) для выявления точечных объемных дефектов методом TOFD. При этом фактические размеры дефектов не определяются.

EDN: EJGSKJ, <https://elibrary/ejgskj>

Ключевые слова: сварной шов, ультразвуковой контроль, дифракционно-временной метод, металлографический анализ, одиночный объемный дефект, неметаллические включения

This paper examines a case study illustrating the ability of ultrasonic testing to detect defects smaller than a wavelength. A single point defect was detected in a welded joint of steel parts produced by flash-butt welding using a time-of-flight diffraction (TOFD) method using a longitudinal wave at a frequency of 5 MHz, i.e., a wavelength of approximately 1.2 mm. Its presence in the weld was subsequently confirmed using phased arrays. Based on the results of metallographic analysis, the defect type was determined to be a rounded slag inclusion with smooth edges and dimensions of approximately 1 mm. It was also shown that the welded joint also contained localized zones with coarse grains and uniformly distributed small non-metallic inclusions with an average size of up to 0.1 mm in the fusion zone. However, during ultrasonic testing, these structures created only background noise and did not

interfere with the detection of the slag inclusion. The obtained data confirm the achievable sensitivity of approximately 1 mm in detecting of single volumetric defects using the TOFD method. However, the actual defect sizes are not determined.

EDN: EJGSKJ, <https://elibrary/ejgskj>

Keywords: weld, ultrasonic testing, diffraction-time method, metallographic analysis, single volumetric defect, non-metallic inclusions

При продолжительной эксплуатации изделий ответственного назначения возможность их дальнейшего применения на заданных режимах прогнозируют на основании прочностных расчетов, которые выполняют по результатам периодического диагностирования. Для повышения точности таких расчетов необходимо расширять возможности неразрушающих методов контроля по выявлению и измерению размеров дефектов в материалах и сварных швах.

В некоторых публикациях, в частности [1], отмечена возможность измерения этих размеров с погрешностью в доли миллиметра. Однако даже современные методы ультразвукового контроля (УЗК), включая наиболее распространенный дифракционно-временной метод (Time of Flight Diffraction — TOFD), позволяют лишь оценивать размеры дефектов [2–4]. Это связано с несколькими обстоятельствами, важнейшие из которых — импульсный характер излучения и миллиметровый диапазон длин ультразвуковых (УЗ) волн. Также сказывается возникновение шумов при рассеянии УЗ-волн на микронеровностях в объеме контролируемых материалов.

В результате погрешность измерения условной высоты дефекта в сечении сварного шва чаще всего составляет 1...2 мм, а погрешность определения его протяженности вдоль оси шва может быть еще больше. Поэтому, если размеры реального дефекта естественного происхождения близки к 1 мм, то даже дифракционными методами их измерить не удастся. Возникает вопрос, какой минимальный дефект можно выявить с помощью метода TOFD, пусть даже без измерения его фактических размеров.

При ультразвуковой дефектоскопии вопрос о минимальных размерах дефекта, которые можно выявить, традиционно решали с использованием понятия предельной чувствительности. Согласно ГОСТ 14782–86, так называют характеристику дефектоскопа в комплекте с УЗ-преобразователем, которую следует измерять в квадратных миллиметрах по площади дна отверстия в образцах для настройки оборудо-

вания. Однако очевидно, что это определение не соответствует практике использования дифракционных методов.

Целесообразно ориентироваться на другие определения, например приведенные в работе [5] или СТО Газпром 2-2.4-083–2006. Согласно этим источникам, под чувствительностью контроля можно понимать минимальные размеры дефектов конкретного типа, находящихся на данном расстоянии от контролируемой поверхности и выявляемых данным видом контроля при определенных условиях его проведения.

К сожалению, в такой трактовке этот термин не всегда используют при описании возможностей оборудования для УЗК. Так, в рекламных материалах, сопровождающих предложения различных ультразвуковых дефектоскопов для ручного и механизированного контроля, указаны только размеры выявляемых дефектов (0,6...0,9 мм и более) без описания их типа (поры, трещины и др.).

Известны работы по выявлению искусственных дефектов с малым раскрытием от 0,14 мм, в частности [6–9]. Однако в них рассмотрены искусственно изготовленные пазы. В некоторых публикациях, например [9, 10], отмечена возможность обнаружения небольших естественного происхождения плоскостных дефектов высотой 2...3 мм в сечении сварных швов — трещин, несплавов и непроваров. Но и в этих статьях не рассматривалась минимальная высота дефекта, который можно выявить при УЗК дифракционными методами, в частности методом TOFD.

Полное решение этого вопроса требует проведения УЗК большой партии однотипных образцов и сравнения полученных результатов с данными металлографического анализа. Однако изготовить изделия с естественными дефектами заданной формы и малыми размерами (не более 1 мм) достаточно сложно, а если дефекты образовались при сварке, то их металлографическое исследование по определению фактических размеров — очень трудоемкая задача, осо-

бенно с учетом необходимости рассмотрения большого количества образцов для получения достоверных статистических данных.

В связи с этим становится актуальным вопрос, какова чувствительность современных дифракционных методов УЗК, т. е. каковы минимальные размеры дефектов естественного происхождения, которые можно выявить с помощью этих методов, пусть даже без измерения размеров.

Цель работы — демонстрация возможностей метода TOFD на примере выявления одиночного шлакового включения размером около 1 мм.

С учетом общих принципов применения метода TOFD и того, что такой дефект относится к объемным, возможность его выявления представляется неочевидной.

Выявление при УЗК одиночного объемного дефекта размером около 1 мм. Исследование по выявлению объемного дефекта методами УЗК с последующим вскрытием проконтролированных образцов проведены при контроле качества сварных швов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. Несмотря на довольно большое количество работ, посвященных возможностям УЗК швов, выполненных этим методом, в частности [6–10], совершенствование технологии УЗК остается актуальным.

Схемы сканирования сварного шва, выполненного контактной стыковой сваркой оплавлением, приведены на рис. 1. Материал образцов — углеродистая сталь толщиной 27,5 мм, применяемая при строительстве магистральных трубопроводов. В поперечном сечении шва

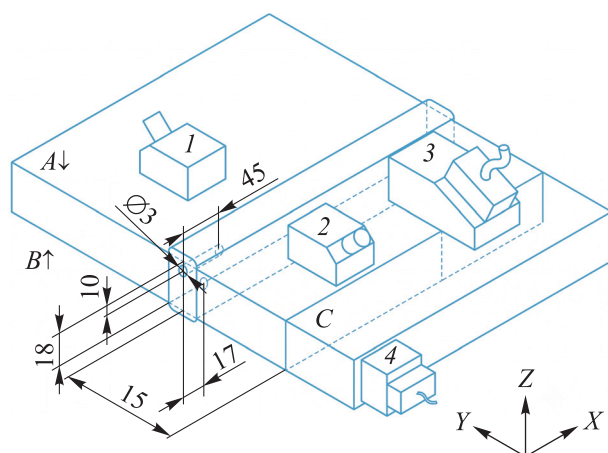


Рис. 1. Схемы сканирования сварного шва, выполненного контактной стыковой сваркой оплавлением

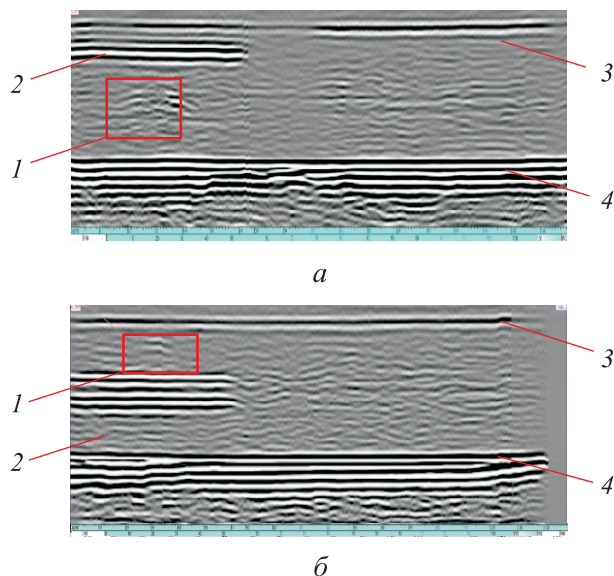


Рис. 2. Результаты сканирования образца методом TOFD с поверхностями A (a) и B (б):

1 — сигнал от дефекта; 2 — сигнал от БЦО; 3 — сигнал от головной волны; 4 — донный сигнал

выполнено боковое цилиндрическое сверление (БЦО) диаметром 3 мм с осью на глубине 10 мм от поверхности A.

Контроль образца проводили методом TOFD с двух поверхностей A и B. При этом сканирование сварного шва выполняли в направлении оси X, т. е. вдоль оси шва при следующих типовых для метода TOFD параметрах: волна — продольная; частота — 5 МГц; угол ввода — 60°; расстояние между точками ввода двух пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) — 64 мм; длительность импульса (ориентировочно) — 1,5 мкс. При табличном значении скорости УЗ-волны $5,85 \cdot 10^3$ м/с ее длина составляла примерно 1,2 мм.

Результаты сканирования приведены на рис. 2. (Сканы получены инженером А.В. Шевченко, ФГАУ «НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана»). Помимо сигнала от БЦО в образце вблизи линии сплавления на глубине около 18 мм от поверхности A и, соответственно, на расстоянии около 9 мм от поверхности B, на расстоянии около 6 мм до ближайшей точки БЦО на обоих сканах обнаружены единичные локальные сигналы (на рис. 2 выделены красными рамками).

Согласно рекомендациям работы [2], ISO 10863:2020 и ГОСТ ISO 10863–2022, единичные локальные сигналы можно интерпретировать как созданные УЗ-волнами, рассеянными на точечном дефекте. В соответствии с указанными

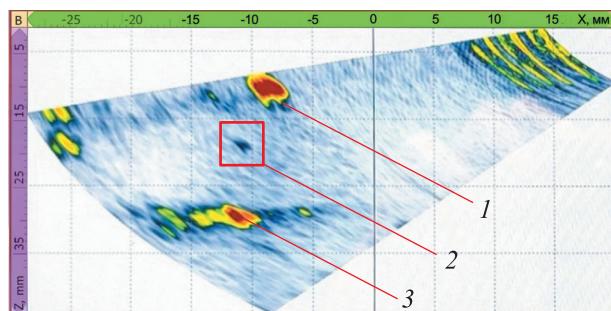


Рис. 3. Результаты секторного сканирования с поверхности А:
1 — сигнал от БЦО; 2 — сигнал от дефекта;
3 — сигнал от граты

ми документами при малой высоте таких дефектов их размеры методом TOFD не определяются. Действительно, при указанной длительности импульса и других параметрах контроля разность времени приема отклика от верхней и нижней габаритных точек дефекта слишком мала, чтобы соответствующие сигналы можно было разрешить во времени.

Известно, что включения или поры в сварных швах, а также некоторые плоскостные дефекты малых размеров можно выявить радиографическими методами [11]. Однако в данном случае на рентгеновских снимках на месте, соответствующем указанным индикациям, дефект не просматривался. Возможно, он экранировался изображением БЦО. Поэтому для подтверждения того, что обнаруженные сигналы создавались дефектом, расположенным в шве, дополнительно по нескольким схемам выполнен УЗК этого шва совмещенным ПЭП с 32-элементной фазированной решеткой.

Сначала ПЭП располагали в положении 3 на поверхности А и перемещали вдоль оси шва в направлении оси X. При этом выполняли сек-

торное сканирование зоны сплавления на частоте 5 МГц в диапазоне угла $40...70^\circ$. На рис. 3 показан полученный S-скан сечения, в котором амплитуда анализируемого сигнала была максимальной. Она оказалась на 18 дБ меньше амплитуды сигнала от БЦО, но выше примерно на 6 дБ, чем уровень шумов в близкой окрестности.

Затем для упрощения наблюдения за интересующей областью СШ образец разрезали на расстоянии 15 мм от плоскости сплавления и выполняли его линейное сканирование с образовавшейся торцевой поверхности С. ПЭП с фазированной решеткой устанавливали в положение 4 и перемещали по поверхности С в двух направлениях: вдоль шва — по направлению оси X, и по толщине образца — вдоль оси Z (см. рис. 1). Полученные В-сканы сечения сварного шва показаны на рис. 4.

Во всех случаях в плоскости сплавления вблизи от БЦО выявлен сигнал, который в соответствии с рекомендациями [12] можно квалифицировать как сигнал от локального (точечного) дефекта. Согласно рис. 3 и 4, а, источник этого сигнала удален на 6 мм от БЦО, а согласно рис. 3 и 4, б, он смещен от плоскости сплавления примерно на 1 мм.

Сравнение результатов металлографического исследования и УЗК. Чтобы подтвердить выявление дефекта естественного происхождения, выполняли металлографический анализ зоны сплавления. Для этого с шагом $0,5...1,1$ мм проводили послойное шлифование сварного шва в плоскостях, перпендикулярных к плоскости сплавления, и изготавливали микрошлифы каждой полученной поверхности. Полученные результаты приведены на рис. 5–7.

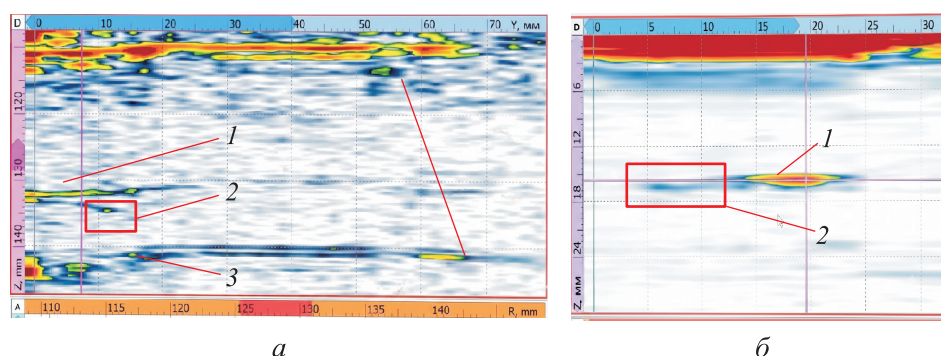


Рис. 4. Результаты линейного сканирования с торца образца, отстоящего от плоскости сплавления на 15 мм, при перемещении ПЭП вдоль осей X (а) и Z (б):
1 — сигнал от БЦО; 2 — сигнал от дефекта; 3 — сигналы от донной поверхности призмы в положении 4

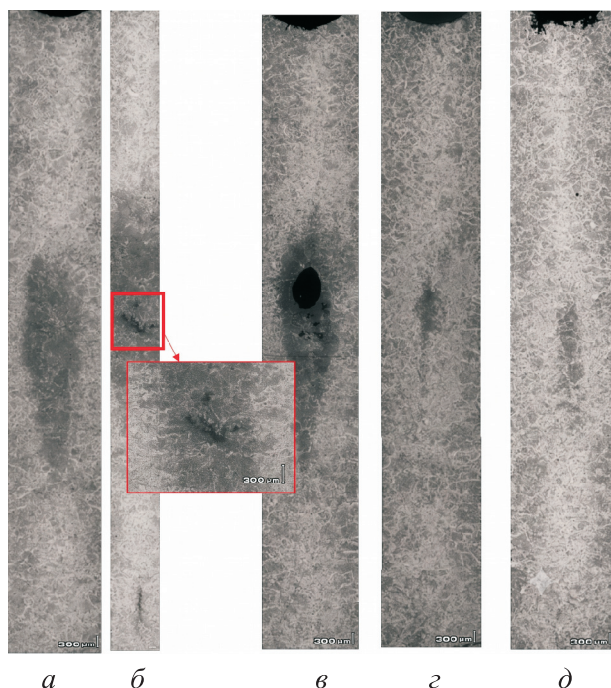


Рис. 5. Микроструктура материала в первом (а), втором (б), третьем (в), четвертом (г) и пятом поперечных сечениях (д) сварного шва на участке протяженностью 4 мм вдоль его оси

В верхней части рис. 5 видно изображение края БЦО, на расстоянии 6,2 мм от которого обнаружен дефект, заполненный твердым веществом, имеющий гладкую овальную поверхность и несколько вытянутый в вертикальной плоскости. Четко очерченная граница дефекта обнаружена только в одном из пяти исследованных сечений — третьем (см. рис. 5, в). Обнаруженный дефект классифицирован как шлаковое включение (по ГОСТ 10243–75) с размерами 1,2×0,78 мм в поперечном сечении шва. С учетом шага шлифования протяженность этого дефекта вдоль оси сварного шва составила 1,0...1,5 мм.

Детализация микроструктуры материала в третьем сечении показана на рис. 6. Выявлены две особенности.

Во-первых, над и под центральной частью, а также в зоне термического влияния имеются видманштеттовы структуры с размером зерна 3 балла (по ГОСТ 5640–2020), с тонкими иглами, отходящими от ферритной сетки и расположенными внутри зерен. Эти микроструктуры вытянуты и закономерно ориентированы в кристаллах новой фазы, расположенных на шлифе параллельно или под определенным углом друг к другу. Исходя из принципа структурного соответствия [13], эти структуры могут возникать из-

за перегрева металла при выполнении контактной сварки оплавлением. Также причиной их образования может быть анизотропия упругих свойств металла [14, 15]. Однако каким-либо иным образом эта анизотропия в рассматриваемом случае не проявилась.

Во-вторых, в центральной области шва при металлографическом анализе обнаружена крупнозернистая перлитно-ферритная структура с размером аустенитного зерна крупнее минус 1 (по ГОСТ 5639–82.).

Как показано на рис. 7, в зоне видимости вблизи линии сплавления имеются многочисленные равномерно и хаотично распределенные неметаллические включения в виде хрупких силикатов крупнее 5 баллов (по ГОСТ 1778–2022) и прерывистые структуры неправильной формы (разрыхления и раковины) с пустотой внутри — внутренние несплошности размером до 100 мкм, образовавшиеся вследствие загрязнения металла неметаллическими включениями неправильной формы. Расстояние между этими структурами можно оценить в диапазоне 10...200 мкм.

Описанные особенности металла, кроме шлакового включения, обнаружены на микрошлифах всех исследованных сечений.

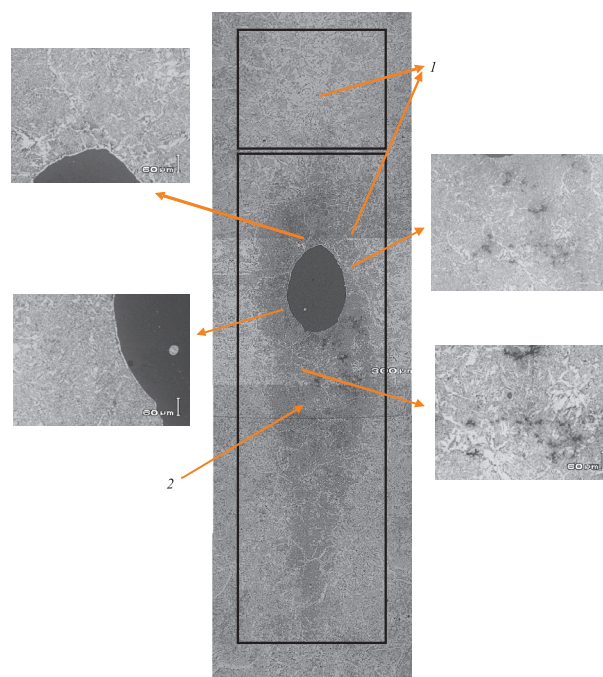


Рис. 6. Микроструктура шлакового включения и его окрестности с увеличением ×50 в центре и ×200 по бокам:

1 — зоны с видманштеттовой структурой; 2 — зоны с укрупненным зерном; темное травление

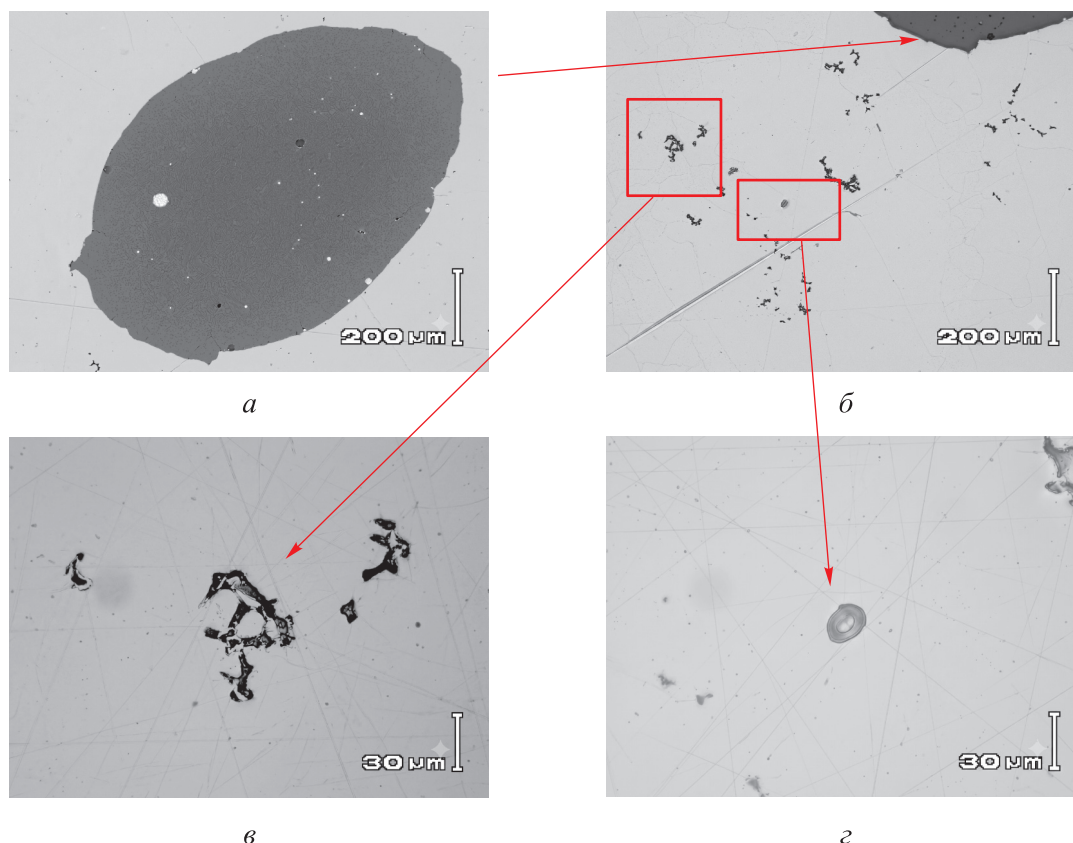


Рис. 7. Микроструктура шлакового включения отдельно (а) с прерывистыми внутренними структурами (б, в) и округлыми недеформирующимися силикатными включениями (г)

Единственное существенное отличие третьего сечения металла (см. рис. 5) от других заключается в наличии шлакового включения с размерами в поперечном сечении сварного шва $1,2 \times 0,78$ мм и протяженностью вдоль оси шва не более 1,5 мм. Следовательно, по данным металлографического анализа можно заключить, что в рассмотренном сварном шве при УЗК методом TOFD выявлено одиночное шлаковое включение размером около 1 мм.

Происхождение шумов, которые проявляются вне зоны расположения БЦО в виде неярко выраженных бликов, более или менее равномерно распределенных на сечениях (см. рис. 2–4), можно связать с прочими описанными особенностями структуры металла, которые выявлены при металлографическом анализе зоны сплавления.

Следует иметь в виду, что на частоте 5 МГц, на которой выполнен УЗК, изменение скорости продольной волны в сталях с перлитно-ферритными структурами, не имеющими явно выраженной анизотропии или слоистости, не превышает 1...3 % [16, 17]. Это в равной степени относится и к материалам с видманштеттовой

структурой, и к отдельным перлитно-ферритным зернам. Следовательно, по крайней мере, для продольных волн коэффициенты отражения УЗ-волн от таких структур не превышают 1 %, и при УЗК методом TOFD отклики от таких структур могут возникать только на уровне шумов.

Также только на уровне шумов могут возникать и отклики от распределенных случайным образом мелких прерывистых включений неправильной формы размером менее 100 мкм, показанных на рис. 7. Длина продольных УЗ-волн в среднем не менее чем в 10 раз больше, чем средний размер включений такого типа, и рассеяние на них близко к рэлеевскому, т. е. не создает детерминированных сигналов, которые можно явно выделить на дисплее.

Выводы

1. На примере результатов сканирования сварного шва, выполненного контактной стыковой сваркой оплавлением, показано, что УЗК методом TOFD обладает чувствительностью, достаточной для выявления одиночного объ-

емного дефекта размером около 1 мм с гладкими округлыми границами. Возможность выявления такого дефекта также подтверждена при УЗК с использованием фазированных решеток. Это — значительно более высокая чувствительность по сравнению с той, которая описана в работах по контролю качества соединений, выполненных данным видом сварки [9, 10]. При этом методами УЗК можно выявить дефект, но нельзя измерить его размеры.

2. Согласно данным металлографического анализа, обнаруженный дефект определен как шлаковое включение размером 1,2×0,78 мм в поперечном сечении сварного шва, его протя-

женность вдоль оси шва не превышала 1,5 мм. Также в зоне сплавления и околошовной зоне выявлено укрупнение зерна, которое характерно для контактной стыковой сварки оплавлением и обычно усложняет проведение УЗК. Оно проявилось в виде локальных перлитно-ферритных и видманштеттовых структур. Также в зоне сплавления обнаружены локальные хаотично расположенные включения размером до 0,1 мм и расстоянием между ними до 0,2 мм. Однако указанные неоднородности материала сварного шва при УЗК на частоте 5 МГц, т. е. при длине продольной УЗВ около 1,2 мм, проявились лишь на уровне шумов.

Литература

- [1] Caulder A. Full matrix capture and total focusing method: the next evolution in ultrasonic testing. *Mater. Eval.*, 2018, vol. 76, no. 5, pp. 591–597.
- [2] Гинзел Э. TOFD. *Дифракционно-временной метод ультразвуковой дефектоскопии*. Москва, ДПК Пресс, 2021. 312 с.
- [3] Вopilкин А.Х., ред. *Неразрушающий контроль. Ультразвуковые методы. Цифровые когерентные технологии*. Москва, Спектр, 2025. 640 с.
- [4] Могильнер Л.Ю., Стекольников Я.А. Измерение размеров дефектов и физические ограничения цифровой обработки данных при ультразвуковой дефектоскопии эхо- и дифракционными методами. *Дефектоскопия*, 2025, № 9, с. 32–44.
- [5] Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. *Неразрушающий контроль*. Т. 3. Ультразвуковой контроль. Москва, Машиностроение, 2008. 864 с.
- [6] Алешин Н.П., Григорьев М.В., Козлов Д.М. и др. Неразрушающий контроль качества сварных соединений трубопроводов, выполненных контактной сваркой оплавлением. *Территория нефтегаз*, 2015, № 11, с. 44–48.
- [7] Алешин Н.П., Григорьев М.В., Крысько Н.В. Влияние конфигурации вершины источника дифракции на амплитуду ультразвукового дифрагированного сигнала. *Сварка и диагностика*, 2019, № 6, с. 19–21.
- [8] Алешин Н.П., Крысько Н.В., Козлов Д.М. и др. Экспериментальное исследование дифракции упругих волн на модели трещины. *Дефектоскопия*, 2021, № 1, с. 15–22, doi: <https://doi.org/10.31857/S0130308221010024>
- [9] Кучук-Яценко С.И., Радько В.П., Казымов Б.И. и др. Особенности обнаружения дефектов при ультразвуковом контроле соединений труб, выполненных контактной сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*, 2007, № 1, с. 39–43.
- [10] Могильнер Л.Ю., Козлов Д.М. Новые направления ультразвукового контроля стыков, выполненных контактной сваркой оплавлением. *Электрометаллургия*, 2025, № 13, с. 27–39.
- [11] Соснин Ф.Р., Ключев В.В., ред. *Неразрушающий контроль*. Т. 1. Кн. 1. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2. Радиационный контроль. Москва, Машиностроение, 2008. 560 с.
- [12] Ginzl E. *Phased array ultrasonic technology*. Eclipse Scientific, 2013. 348 p.
- [13] Новиков И.И. *Теория термической обработки металлов*. Москва, Металлургия, 1978. 392 с.
- [14] Карпов Е.Ю. *Исследование наследственности видманштеттова феррита и разработка мероприятий по повышению качества стального литья*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Волгоград, ВолГТУ, 1997. 19 с.
- [15] Cottura M., Appolaire B., Finel A. et al. Phase field study of acicular growth: role of elasticity in Widmanstätten structure. *Acta Mater.*, 2014, vol. 72, pp. 200–210, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.03.045>

- [16] Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. *Скорость звука и структура сталей и сплавов*. Новосибирск, Наука, 1996. 181 с.
- [17] Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В. Неравномерность акустической анизотропии толстолистового стального проката. *Сталь*, 2021, № 5, с. 36–41.

References

- [1] Caulder A. Full matrix capture and total focusing method: the next evolution in ultrasonic testing. *Mater. Eval.*, 2018, vol. 76, no. 5, pp. 591–597.
- [2] Ginzel E. TOFD. *Difraktsionno-vremennoy metod ultrazvukovoy defektoskopii* [Diffraction-time method of ultrasonic flaw detection.]. Moscow, DPK Press, 2021. 312 p. (In Russ.).
- [3] Vopilkin A.Kh., ed. *Nerazrushayushchiy kontrol. Ultrazvukovye metody. Tsifrovye kogerentnye tekhnologii* [Non-destructive testing. Ultrasonic methods. Digital coherent technologies]. Moscow, Spektr Publ., 2025. 640 p. (In Russ.).
- [4] Mogilner L.Yu., Stekolshchikov Ya.A. Defects size measurement and physical limitations of digital data processing in ultrasonic flaw detection by echo and diffraction methods. *Defektoskopiya*, 2025, no. 9, pp. 32–44. (In Russ.).
- [5] Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Nerazrushayushchiy kontrol. T. 3. Ultrazvukovoy kontrol* [Non-destructive testing. Vol. 3. Ultrasonic testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 864 p. (In Russ.).
- [6] Aleshin N.P., Grigoryev M.V., Kozlov D.M. et al. Non-destructive testing of pipelines welded joints made by flash butt welding. *Territoriya neftegaz*, 2015, no. 11, pp. 44–48. (In Russ.).
- [7] Aleshin N.P., Grigoryev M.V., Krysko N.V. Effect of the configuration of the top of the diffraction source on the amplitude of the ultrasonic diffractable signal. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2019, no. 6, pp. 19–21. (In Russ.).
- [8] Aleshin N.P., Krysko N.V., Kozlov D.M. et al. Experimental study of diffraction of elastic waves on crack model. *Defektoskopiya*, 2021, no. 1, pp. 15–22, doi: <https://doi.org/10.31857/S0130308221010024> (in Russ.). (Eng. version: *Russ. J. Nondestruct. Test.*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 13–20, doi: <https://doi.org/10.1134/S1061830921010022>)
- [9] Kuchuk-Yatsenko S.I., Radko V.P., Kazymov B.I. et al. Features of defect detection during ultrasonic testing of pipe joints made by contact fusion welding. *Avtomaticheskaya svarka*, 2007, no. 1, pp. 39–43. (In Russ.).
- [10] Mogilner L.Yu., Kozlov D.M. New trends in ultrasonic testing of flash butt welded joints. *Elektrometallurgiya*, 2025, no. 13, pp. 27–39. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Metall.*, 2025, vol. 2025, no. 1, pp. 106–115, doi: <https://doi.org/10.1134/S0036029525700879>)
- [11] Cosnin F.R., Klyuev V.V., eds. *Nerazrushayushchiy kontrol. T. 1. Kn. 1. Vizualnyy i izmeritelnyy kontrol. Kn. 2. Radiatsionnyy kontrol* [Non-destructive testing. Vol. 1. Book 1. Visual and measuring testing. Book 2. Radiation monitoring]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 560 p. (In Russ.).
- [12] Ginzel E. *Phased array ultrasonic technology*. Eclipse Scientific, 2013. 348 p.
- [13] Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 392 p. (In Russ.).
- [14] Karpov E.Yu. *Issledovanie nasledstvennosti vidmanshtettova ferrita i razrabotka meropriyatiy po povysheniyu kachestva stalnogo litya*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of the heredity of Widmanstätten ferrite and development of measures to improve the quality of steel casting. Abs. kand. tech. nauk. diss.]. Volgograd, VolGTU Publ., 1997. 19 p. (In Russ.).
- [15] Cottura M., Appolaire B., Finel A. et al. Phase field study of acicular growth: role of elasticity in Widmanstätten structure. *Acta Mater.*, 2014, vol. 72, pp. 200–210, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.03.045>
- [16] Muravyev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. *Skorost zvuka i struktura staley i splavov* [The ultrasonic velocity and structure of steels and alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 181 p. (In Russ.).
- [17] Volkova L.V., Muravyeva O.V., Muravyev V.V. Nonuniformity of acoustic anisotropy of thick-sheet steel. *Stal*, 2021, no. 5, pp. 36–41. (In Russ.). (Eng. version: *Steel Transl.*, 2021, vol. 51, no. 5, pp. 335–341, doi: <https://doi.org/10.3103/S0967091221050120>)

Информация об авторах

МОГИЛЬНЕР Леонид Юрьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана; главный научный сотрудник. ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: mogilner@mail.ru).

ЩИПАКОВ Никита Андреевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана; руководитель департамента науки. ФГАУ «НУЦСК при МГТУ им. Н.Э. Баумана» (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: shchipak@bmstu.ru).

ГУРКИН Сергей Вадимович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: gurkinsv@bmstu.ru).

ФОМИНА Людмила Петровна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: fominalp@yandex.ru).

ВОРЫХАНОВ Александр Витальевич — аспирант кафедры «Сварка, диагностика и специальная робототехника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: Vorykhanov00@yandex.ru).

Information about the authors

MOGILNER Leonid Yuryevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University; Chief Researcher, Welding and Testing of BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mogilner@mail.ru).

SHCHIPAKOV Nikita Andreevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University; Head of the Department of Science. Welding and Testing of BMSTU (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: shchipak@bmstu.ru).

GURKIN Sergey Vadimovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: gurkinsv@bmstu.ru).

FOMINA Lyudmila Petrovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Materials Science. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: fominalp@yandex.ru).

VORYKHANOV Alexander Vitalievich — Postgraduate, Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: Vorykhanov00@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Могильнер Л.Ю., Щипаков Н.А., Гуркин С.В., Фомина Л.П., Ворыханов А.В. Оценка чувствительности дифракционно-временного метода ультразвукового контроля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 7, с. 53–61.

Please cite this article in English as:

Mogilner L.Yu., Shchipakov N.A., Gurkin S.V., Fomina L.P., Vorykhanov A.V. Sensitivity assessment of the time-of-flight diffraction method of ultrasonic testing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 7, pp. 53–61.