

УДК 621.791.762:620.179.16

## ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ, ВЫПОЛНЕННЫХ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**,  
**В. П. РАДЬКО**, **Б. И. КАЗЫМОВ**, **И. В. ЗЯХОР**, кандидаты техн. наук, **А. В. НИКОЛЬНИКОВ**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Показано, что при контроле толстостенных труб большого диаметра эффективным методом ультразвукового контроля является эхо-зеркальный метод с преобразователями, включенными по схеме тандем. При контроле тонкостенных труб малого диаметра целесообразно использовать раздельно-совмещенные преобразователи хордового типа. Показано, что эхо-сигналы от дефектов и помех в виде выступов отличаются между собой временем прихода, что позволяет надежно идентифицировать дефекты и помехи от возможных выступов, образовавшихся от смещения свариваемых кромок или от оставшегося после удаления грата усиления.

*Ключевые слова:* автоматическая контактная стыковая сварка оплавлением, сварные соединения, ультразвуковой контроль, качество, дефекты, методика, ложные сигналы, выявляемость дефектов

В соответствии с требованиями нормативных документов сварные соединения трубопроводов подлежат контролю операционными и неразрушающими методами. На практике независимо от способа сварки широко применяют такие неразрушающие методы контроля, как ультразвуковой (УЗК) и рентгеновский (РК) [1, 2].

При автоматической контактной стыковой сварке (КСС) оплавлением в зоне соединения (рис. 1, а) могут образоваться два вида дефектов — незакрывшийся кратер, представляющий собой несплошность (рис. 1, б), и оксидные пленки (рис. 1, в, г). Последние в зависимости от толщины подразделяются на два типа, существенно отличающихся как строением, так и влиянием на механические свойства соединений. Первый — это оксидные пленки толщиной до нескольких десятых миллиметра; они представляют собой обыкновенную окалину. Такой тип дефектов называют толстыми оксидными пленками. Другой тип — раздробленные оксидные пленки. Аналогами незакрывшихся кратеров при электродуговой сварке являются поры, а оксидных плен — несплавления.

Подобные дефекты при КСС появляются только в случае грубых отклонений от заданных значений основных параметров оптимального режима сварки, которые в течение всего процесса сварки выявляются компьютеризированной системой

контроля [3]. Такими системами в настоящее время оснащаются все сварочные комплексы для КСС, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона. Они выявляют все отклонения от заданных значений параметров, включая допустимые и недопустимые, и подают соответствующие сигналы, по которым определяют возможность образования тех или иных дефектов. Как следует из данных, полученных при исследовании нескольких тысяч километров промышленных трубопроводов, при КСС достигается наиболее низкий процент (около 0,2 %) забракованных стыков по сравнению с другими способами сварки труб [4]. При этом большинство из стыков были забракованы в связи с нарушением требований к подготовительным операциям перед сваркой, например из-за недопустимого размера смещения свариваемых кромок при центровке труб в зажимах сварочной машины перед сваркой. Основным методом контроля при сварке трубопроводов был и остается операционный контроль параметров режима сварки, достоверность которого подтверждена безаварийной эксплуатацией трубопроводов в течение нескольких десятков лет.

При сооружении новых систем трубопроводов, рассчитанных на эксплуатацию при повышенном давлении в сложных производственных условиях, значительно ужесточаются требования к надежности сварных соединений. В соответствии с этим возрастают требования к выявляемости дефектов, которые могут образоваться как в металле труб,

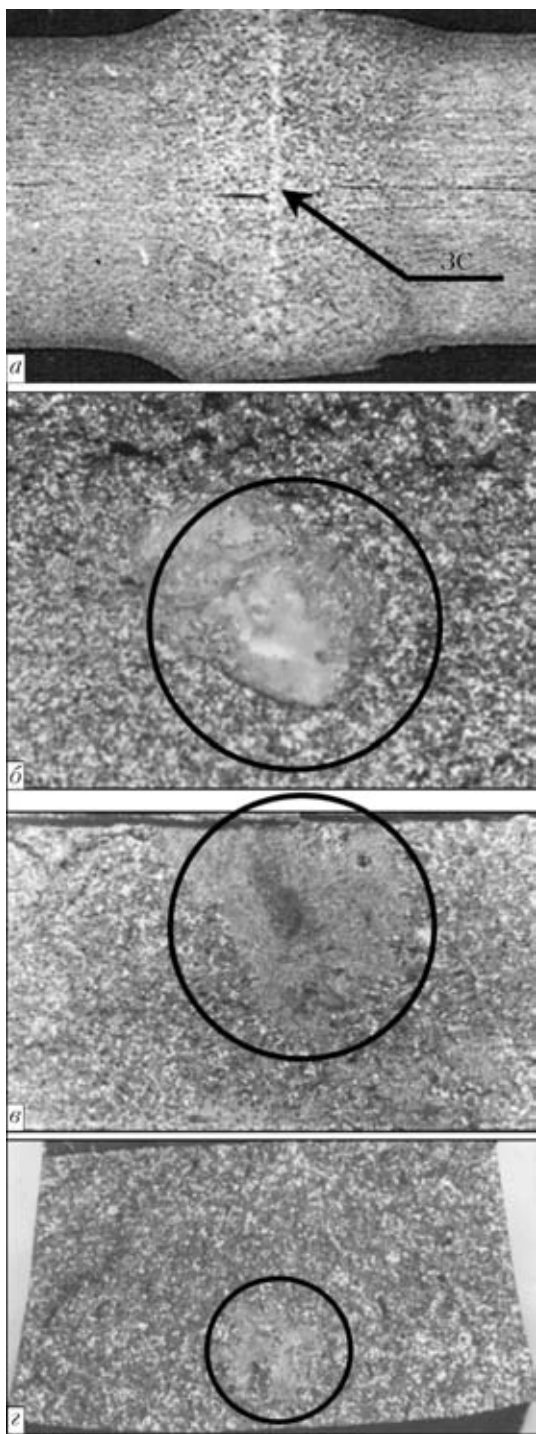


Рис. 1. Макрошлиф сварного соединения (*а*) и характерные дефекты на поверхности его изломов: *б* — незакрывшийся кратер; *в, г* — соответственно толстая и раздробленная оксидная пленка

так и в сварных соединениях и оказывать отрицательное влияние на их свойства.

Цель настоящей работы — исследование эффективности УЗК с применением различных методов и аппаратуры при обнаружении указанных выше дефектов, которые могут образоваться в сварных соединениях трубных сталей, полученных КСС, в результате различных нарушений технологии подготовки труб, сварочного и вспомогательного оборудования для сварки, а также в

процессе ее выполнения и отрицательно влиять на механические свойства соединений. На первом этапе исследований для обнаружения дефектов различного рода использовали критерии, принятые при УЗК электродуговых швов.

Исследования проводили на образцах сварных соединений труб диаметром от 114 до 1420 мм с толщиной стенки 6...18 мм, а также на сварных пластинах, вырезанных из этих труб. Все отклонения основных параметров режима от оптимальных значений, которые закладывались для получения в сварных соединениях необходимых дефектов, регистрировались компьютеризированной системой контроля [3]. После УЗК из каждой партии сварных соединений одну половину стыков подвергали стандартным механическим испытаниям на растяжение и на загиб, а другую — принудительному разрушению по зоне соединения, для чего перед испытаниями по центру сварного стыка делали надрез. После испытаний для подтверждения результатов УЗК исследовали поверхность изломов всех разрушенных образцов.

На рис. 1, *а* изображен макрошлиф сварного соединения, выполненного КСС. В зоне соединения (ЗС) могут встречаться дефекты, представленные на рис. 1, *б-г*. На рис. 1, *б* показана поверхность излома с дефектом типа незакрывшегося кратера. В этом случае в месте дефекта отсутствует газовый промежуток между контактными поверхностями свариваемых труб. Такие объемные дефекты обнаруживаются с помощью классических методов УЗК, используемых при контроле швов, выполненных дугowymi способами сварки.

Практически аналогичные условия для тех же приемов УЗК создаются и при поиске толстых оксидных пленок. Такой дефект представляет собой обыкновенную окалину (рис. 1, *в*). В силу ее физических свойств в процессе охлаждения сварного стыка после сварки в ней возникают большие внутренние напряжения, которые разрушают ее с образованием многочисленных макротрещин (несплошностей). Этому способствует и пластическая деформация металла в плоскости стыка во время осадки. На поверхности изломов образцов с такими дефектами трещины видны невооруженным глазом. Амплитуды эхо-сигналов от этих дефектов превышают порог обнаружения, выбранного по контрольным отражателям, используемым при контроле сварных соединений электродуговых швов. Достоверность их обнаружения превышала 0,9.

При поиске такого дефекта, как раздробленные оксидные пленки, в которых несплошности отсутствуют (рис. 1, *г*), технологические возможности классических методов УЗК заметно сужаются. В сварном стыке указанный дефект возникает на участках металла торцов труб, где есть возможность образования оксидных пленок

толщиной менее 200 мкм. При осадке металл торцов претерпевает значительную пластическую деформацию. В результате в плоскости соединения возникают растягивающие напряжения, которые разрывают оксидную пленку с образованием нескольких макрофрагментов. В местах разрыва формируется металлическая связь между свариваемыми трубами. Такие дефекты методом РК не выявляются. При УЗК ввиду отсутствия полости между свариваемыми трубами ультразвуковой сигнал ослабевает, но его уровень все же выше, чем у структурных шумов. Исследования показали, что для выявления раздробленных оксидных пленок в сварных соединениях толщиной 14...32 мм наиболее эффективным методом УЗК является эхозеркальный метод, который реализуется с помощью преобразователей, включенных по схеме тандем, а также адаптивным выбором порога обнаружения, основанным на статистической обработке амплитуд эхо-сигналов, получаемых от сварного соединения по всей его длине [1]. Данная методика особенно эффективна при применении электронной техники. Достоверность выявления дефектов с использованием этой технологии составляла свыше 0,75.

Для обнаружения раздробленных оксидных пленок при сварке труб диаметром 114...325 мм с толщиной стенок 4...8 мм применяют метод УЗК с раздельно-совмещенными преобразователями хордового типа, которые обеспечивают прозвучивание всего сечения шва прямым лучом, при этом помехи, вызванные отражением от усиления, практически отсутствуют [5, 6]. Исследования показали, что благодаря этим особенностям достигается минимальный уровень эхо-сигналов от возможных помех по сравнению с сигналами, полученными при использовании традиционных ультразвуковых преобразователей, что значительно повышает достоверность контроля. Хордовые преобразователи позволяют прозвучивать сварное соединение в раздельно-совмещенном и совмещенном режимах, что дает возможность на основе определения коэффициента формы классифицировать дефекты по видам (объемный и плоскостной).

Для настройки уровня браковочной чувствительности контроля при работе с хордовым преобразователем с целью обнаружения плоскостных (сжатых) дефектов использовали эталонный отражатель в виде торцевого отверстия диаметром 1,2 мм с плоским дном. Уровень поисковой чувствительности недопустимых дефектов в зоне соединения устанавливали на 12 дБ выше браковочного уровня.

Высокий уровень достоверности УЗК с хордовыми преобразователями установлен при контроле нескольких партий сварных стыков труб диаметром 114...325 мм с толщиной стенки 6...9 мм,

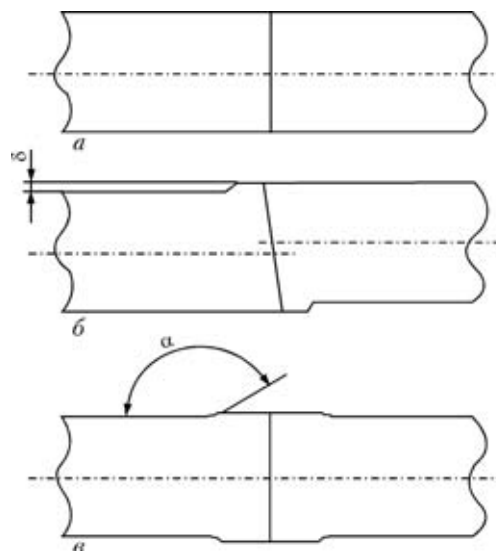


Рис. 2. Схемы сварных соединений, полученных КСС, со снятым gratом (а), смещением  $\delta$  свариваемых кромок (б) и усилением (в)

полученных на различных режимах КСС, включая оптимальные и с грубыми нарушениями. После УЗК стыки принудительно разрушали по зоне соединения.

При контроле качественных стыков с удаленным gratом заподлицо с внутренней и наружной поверхностями (рис. 2, а) на экране дефектоскопа появляются сигналы только от структурных шумов (рис. 3, II, а). Положение верхнего строба 1 отвечает браковочному уровню чувствительности, а нижнего 2 — поисковому уровню чувствительности.

Дефекты, сигналы от которых находятся в области допустимых значений — между нижним 2 и верхним 1 стробами (рис. 3, II, б), чаще всего являются структурной неоднородностью (различного рода включениями). Вместе с тем, отметим, что их влияние на свойства сварных соединений проявляется неоднозначно. Об этом свидетельствует разброс результатов механических испытаний соединений с дефектами указанных типов.

Сигнал, превышающий уровень верхнего порога (рис. 3, II, в), является признаком наличия брака. Сопоставление данных УЗК и результатов анализа поверхности изломов позволило определить достоверность обнаружения сжатых дефектов, которая составляла 0,8...0,9.

В процессе контроля на экране дефектоскопа возможно появление ложных сигналов. Помимо структурных шумов, основными помехами при УЗК являются выступы, образующиеся от смещения свариваемых кромок (рис. 2, б) и наличия усиления шва, остающегося после удаления grата (рис. 2, в).

Смещение свариваемых кромок происходит при сварке труб, которые отличаются допусти-

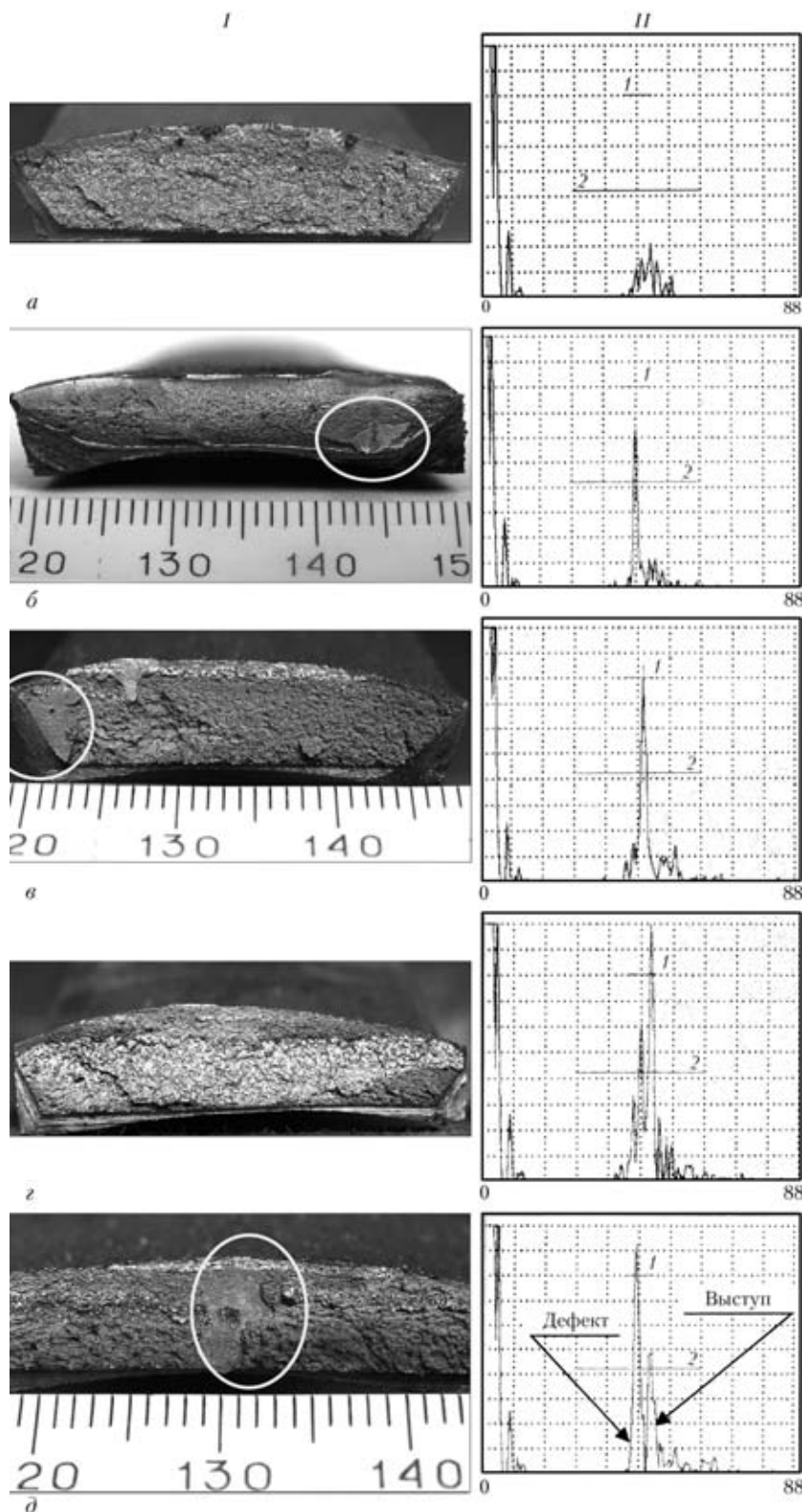


Рис. 3. Вид изломов (I) и отображение (II) эхо-сигналов от металла в зоне сварки (а), структурной неоднородности (б), раздробленной оксидной пленки (в), выступа (г), дефекта и выступа (д)

тат неполного удаления выдавленного металла при осадке. Высота усиления во многом зависит от технологии удаления грата. Например, на первых сварочных машинах К700 (комплекс «Север») применяли внутренний гратосниматель протяжного типа, при работе которого режущие устройства перемещались вдоль образующей трубы. Недостатком гратоснимателя является ограниченная возможность режущего инструмента копировать профиль трубы в зоне сварки. В процессе сварки торцы труб нагреваются до высоких температур, в результате диаметр труб на этом участке увеличивается за счет термического расширения металла. По этой причине режущие устройства не могут копировать реальную поверхность труб в зоне сварки, а поэтому и не могут осуществить полное удаление грата.

В сварочных машинах нового поколения этот недостаток устранен за счет применения внутренних гратоснимателей роторного типа, у которых режущий инструмент относительно небольших размеров движется не по образующей трубы, а по ее окружности. Такие гратосниматели могут удалять грат практически полностью до уровня внутренней поверхности сваренных труб.

На рис. 3, II, г показан эхо-сигнал от допустимого выступа высотой 2 мм при УЗК качественного стыка. В данном случае его уровень выше браковочного, установленного для обнаружения дефектов в зоне соединения. Амплитуда эхо-сигнала от одного и того же выступа может изменяться в зависимости от направления прозвучивания относительно плоскости зоны соединения. При перемещении ультразвуковых преобразователей вдоль стыка эхо-сигнал от выступа может изменяться в зависимости от направления прозвучивания или высоты усиления.

ными размерами, или нарушении технологии центровки торцов труб перед сваркой.

Усиление образуется после удаления грата, при этом остается узкий поясик на отдельных участках стыка или по всей его протяженности как резуль-

тат неполного удаления выдавленного металла при осадке.

При наличии в зоне контроля и дефекта, и выступа (любого происхождения) на экране дефектоскопа будут наблюдаться два сигнала, смещенных во времени. При использовании хордового

преобразователя передние кромки выступов (кромки, расположенные перед ЗС со стороны установки преобразователей) не дают помех, поскольку эхо-сигнал от них не поступает на преобразователь-приемник. Однако помехами при УЗК могут оказаться кромки, расположенные за пределами плоскости ЗС. В этом случае первым приходит сигнал от дефекта, а за ним — сигнал от выступа (рис. 3, II, д). Интервал между ними составляет 4,5 мкс, что отвечает разности расстояний между дефектом и выступом по лучу длиной 7 мм.

Интенсивность эхо-сигналов от выступов зависит от угла  $\alpha$  между двумя смежными поверхностями — поверхностью трубы и боковой стороны усиления (см. рис. 2, в). Установлено, что с увеличением этого угла амплитуда эхо-сигнала уменьшается. Наибольшие помехи при поиске дефектов в зоне соединения имеют место при контроле соединений, полученных КСС на режимах, при которых создаются условия для образования угла  $\alpha = 95...110^\circ$ . Наиболее благоприятны условия для обнаружения дефектов, когда этот угол составляет  $150...170^\circ$ . В этом случае сигналы от усиления практически отсутствуют. На таких режимах сваривают трубы большого диаметра с толщиной стенки 12...20 мм и более.

Для определения местоположения и типа дефектов в образцах сварных соединений, предназначенных для механических испытаний, был применен УЗК, который выполняли двумя способами — используя раздельно-совмещенный наклонный преобразователь с поверхности образцов (поперечными волнами) и прямой преобразователь с торцов образцов (продольными волнами). Дефекты, обнаруженные только наклонным преобразователем, классифицируются как оксидные пленки, а обнаруженные наклонным и прямым преобразователями — как несплошности.

Сравнительный анализ данных, полученных УЗК, и результаты ударных испытаний партии из 20 образцов сечением 10×10 мм показали высокую эффективность предложенного способа идентификации, достоверность которого составляла 0,95.

## Выводы

It is shown that the efficient method of ultrasonic inspection of large-diameter thick-walled pipes is the echo-reflection method involving transducers connected in tandem. For inspection of small-diameter thin-walled pipes, it is expedient to use the chord-type TR transducers. Echo signals from defects and interferences in the form of protrusions are shown to differ in time of arrival, which allows a reliable identification of defects and interferences from the protrusions that may be caused by displacement of the weld edges, or by reinforcement left after removal of flash.

1. При отсутствии в соединении выступов достоверность выявления грубых дефектов (незакрывающихся кратеров и толстых оксидных пленок) составляла 0,95. При наличии выступов на внешней и внутренней поверхностях труб, особенно в случае образования смещений, достоверность выявления дефектов понижается до 0,8 за счет перебраковки.

2. В результате исследований установлено, что для контроля сварных соединений труб малого (до 325 мм) диаметра с толщиной стенок 6...8 мм целесообразно использовать раздельно-совмещенные преобразователи хордового типа, у которых акустическая ось проходит через тело трубы в плоскости, перпендикулярной к вертикальной оси зоны соединения.

3. Исследования показали, что эхо-сигналы от дефектов и помех в виде выступов отличаются временем прихода, что позволяет надежно идентифицировать дефекты и помехи от возможных выступов, образующихся от смещения свариваемых кромок или усиления оставшегося после удаления грата.

4. Совместное применение прямых и наклонных преобразователей, излучающих и принимающих соответственно продольные и поперечные ультразвуковые волны, позволило идентифицировать дефекты по типам — несплошности или оксидные пленки.

1. *Неразрушающий контроль качества сварных конструкций* / В. А. Троицкий, В. П. Радько, В. Г. Демидко, В. Т. Бобров. — Киев: Техника, 1986. — 159 с.
2. *API Standard 1104. Welding of pipelines and related facilities.* — 19th Edition, 1999.
3. *Казимов Б. И., Горішняков А. І., Радько В. П.* Комплексний контроль якості з'єднань, виконаних пресовими видами зварювання: Міжнар. наук.-техн. конф. «Зварювання в енергетиці», м. Київ, 2-3 жовтн. 1996 р. — К., 1996. — С. 49-50.
4. *Мазур И. И., Серафин О. М., Карпенко М. П.* Электроконтактная сварка трубопроводов: пути совершенствования // Стр-во трубопроводов. — 1988. — № 4. — С. 8-11.
5. *Исследование и особенности обнаружения дефектов типа окисных плен при ультразвуковом контроле соединений, выполненных контактной стыковой сваркой* / В. П. Радько, В. А. Троицкий, Б. И. Казымов и др. // 5-а Нац. наук.-техн. конф. і виставка «Неруйнівний контроль та технічна діагностика», м. Київ, 10-14 квітн. 2006 р. — К., 2006. — С. 55-60.
6. *Гиллер Г. А., Могильнер Л. Ю.* Ультразвуковые хордовые преобразователи в дефектоскопии сварных стыков трубопроводов // В мире неразрушающего контроля. — 2000. — № 2 (8). — С. 18-20.

Поступила в редакцию 14.10.2006