



ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКОЙ НЕПРЕРЫВНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Академик НАН Украины **С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО**, чл.-кор. НАН Украины **В. И. КИРЬЯН**,
Б. И. КАЗЫМОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. И. ХОМЕНКО, канд. техн. наук (ЗАО «Псковэлектросвар», РФ)

Проанализированы особенности образования при контактной стыковой сварке оплавлением высококачественных сварных соединений труб. Рассмотрены факторы, влияющие на результаты ударных испытаний стандартных образцов. Проведены исследования вязких свойств металла в зоне сварки с применением различных методов ударных испытаний. Показано, что металл сварного соединения, выполненного на оптимальном режиме, в состоянии после сварки отличается достаточно высоким сопротивлением ударным нагрузкам. Определены условия выполнения контактной стыковой сварки оплавлением и контроля соединений, гарантирующие высокую эксплуатационную надежность трубопроводов.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка оплавлением, трубопроводы, качество соединений, методы ударных испытаний, зона соединения, ударная вязкость, эксплуатационная надежность

При сооружении трубопроводных систем одной из важных задач является обеспечение их эксплуатационной надежности. Она решается путем регламентации целого ряда технических и технологических требований, относящихся как к выполнению сварки, так и к свойствам монтажных (кольцевых) стыков. Механические свойства последних отражают значения прочности и пластичности и должны соответствовать требованиям нормативных документов [1, 2]. Кроме того, для предупреждения разрушений при эксплуатации стыков от наиболее характерных дефектов, свойственных применяемому способу сварки, регламентируются требования и к значению ударной вязкости металла соединения, отражающей энергию, затрачиваемую на разрушение стандартного образца.

В последние десятилетия доминирующим стал метод ударных испытаний образцов с острым механическим надрезом (*KCV*) глубиной $h = 2$ мм с радиусом у дна $r = 0,25$ мм, что было обусловлено высокой вероятностью образования в сварных швах острых концентраторов напряжений, включая трещиноподобные. Сегодня такая методика испытаний и установленные значения ударной вязкости распространяются на все сварные соединения, независимо от способа их получения. Так, в соответствии с требованиями [1] среднее значение ударной вязкости металла сварных соединений труб категории прочности

X52...X70 при температуре испытаний -20 °С должно быть не менее 34,4, а минимальное — 29,4 Дж/см². Эти значения *KCV* определены с учетом неизбежных и допускаемых дефектов для соединений, выполняемых электродуговыми способами сварки. Среди них наружные трещиноподобные дефекты (одно- и двусторонние непровары — несплавления) глубиной до 1 мм и длиной до 30 мм, вогнутость корня шва (утяжины глубиной до 2 мм и длиной до 1/6 периметра сварного стыка), а также внутренние непровары как межслойные, так и по контуру кромок. Кроме того, при электродуговой сварке велика вероятность появления различного рода трещин, которые в сварных соединениях не допускаются, однако их выявляемость промышленными методами неразрушающего контроля в ряде случаев вызывает определенные трудности.

Перенос методики испытаний и приведенных выше нормативных требований *KCV* на сварные соединения, выполняемые другими способами сварки, далеко не всегда оправдан. В случае отсутствия в шве отмеченных выше дефектов обеспечение для всех зон соединения значений *KCV* на уровне 34,4 Дж/см² следует признать нецелесообразным, поскольку такие требования усложняют строительство трубопроводов и ведут к перерасходу материальных средств. Прогрессивным в этом отношении является стандарт API-1104 [2]. В нем не нормируются показатели ударной вязкости, они предъявляются заказчиком в виде специальных требований, которые устанавливаются с учетом конкретных условий строительства и эксплуатации трубопровода. Такой подход направ-



лен на совместное решение двух главных задач: снижение вероятности выхода из строя трубопроводов в процессе эксплуатации с присущими используемому процессу сварки наиболее вероятными дефектами в кольцевых стыках и минимизация затрат на строительство.

Многолетняя практика эксплуатации сварных трубопроводов различных диаметров, в том числе мощных газо- и нефтепроводов диаметром 1420 мм, показывает высокую надежность кольцевых швов, выполненных автоматической контактной стыковой сваркой оплавлением (КСО). Механические свойства этих соединений отвечают всем требованиям нормативных документов, в соответствии с которыми производят крупномасштабное строительство магистральных и промышленных трубопроводов, за исключением отдельных случаев, когда предъявляются особые требования к значению ударной вязкости (в основном при сварке трубопроводов большого диаметра, работающих при отрицательных температурах).

По сравнению с электродуговой сваркой плавлением КСО имеет принципиальные отличия в формировании соединений, которые нуждаются во всестороннем анализе, и учете при обосновании метода оценки соответствия назначению сварных стыков труб, выполненных КСО.

КСО является одним из способов сварки давлением, при котором в зоне соединения (сварном шве) нет расплавленного металла, что исключает

все предпосылки образования таких опасных дефектов, как трещины. При выполнении сварки на оптимальном режиме в зоне соединения (ЗС) отсутствуют и другие дефекты, которые могли бы отрицательно повлиять на их работоспособность. Такой режим сварки определяется путем статистической обработки данных механических испытаний, получаемых в процессе исследования свариваемости каждого типоразмера труб, при условии, что в соединениях полностью отсутствуют недопустимые дефекты сварки. При этом механические свойства должны соответствовать требованиям нормативных документов, предъявляемых к сварным соединениям труб. Оценка качества сварки проводится путем принудительного разрушения сварных стыков по ЗС [3]. Из допустимых дефектов при КСО могут быть только локальные скопления неметаллических включений на отдельных участках ЗС с максимальной площадью 20...30 мм² [4, 5], но поскольку они не влияют на статическую прочность соединений [6], их не следует считать дефектами. С учетом структурного состояния такие неметаллические включения следует отнести к одному из видов структурной неоднородности, наличие которой допускается в металле труб. В некоторых работах такие участки ЗС называют «матовыми пятнами» [7, 8]. Выполнение заданных параметров оптимального режима сварки при КСО обеспечивается компьютеризированной системой управления и контроля без вмешательства сварщика-оператора. Это является определяющим в обеспечении высокой эксплуатационной надежности более 70 тыс. км различных трубопроводов, в том числе более 10 тыс. км трубопроводов диаметром 1420 мм, сваренных КСО [9, 10], которые безаварийно работают свыше 30 лет в различных природных условиях, включая заполярные районы Западной Сибири (рис. 1). Среднее значение ударной вязкости этих соединений, определяемое при испытаниях стандартных образцов с острым механическим надрезом, вершина которого располагается по центру ЗС, составляет 30...40 Дж/см² при интервале рассеяния значений KCV в пределах 14,3...56,3 Дж/см² (температура испытаний 20 °С). Такие значения ударной вязкости металла ЗС в значительной мере обусловлены механической неоднородностью, которая образуется в результате различной степени упрочнения металла в зоне сварки. В соответствии с градиентом температуры в зоне сварки труб (в обе стороны от ЗС) изменяется значение пластической деформации на завершающем этапе сварки — осадке. В результате металл соединения в его поперечном сечении существенно отличается по твердости, а следовательно, и механическим свойствам ($\sigma_{0,2}$, σ_B). Наименьшее значение твердости имеет ЗС. Твердость близлежащих к ней участков зоны свар-

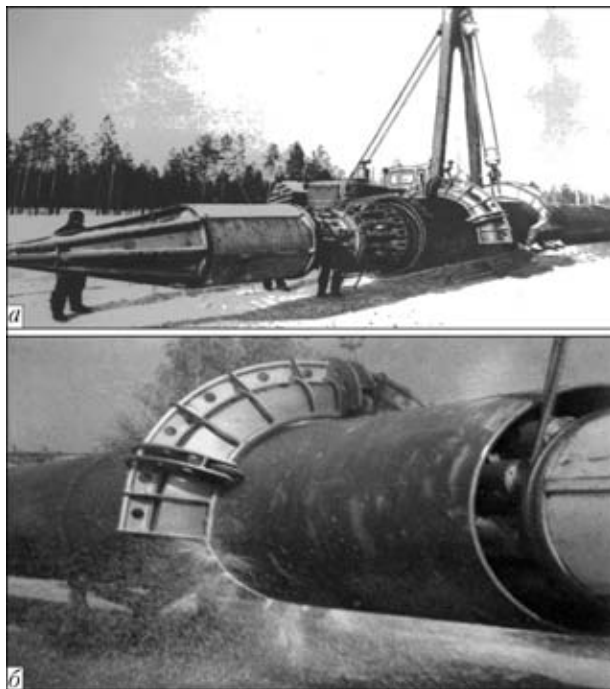


Рис. 1. Сварочный комплекс «Север-1» на трассе строительства трубопровода диаметром 1420 мм в Западной Сибири: а — положение сварочной машины в трубопроводе перед подачей очередной привариваемой трубы; б — выполнение сварки



ки выше, чем у металла труб. При сварке труб современного производства из низкоуглеродистых малолегированных сталей ширина участка с ЗС в зависимости от режима сварки может быть в пределах 0,5...5 мм. Разница в твердости, а следовательно, прочности, этого участка по сравнению с близлежащими участками зоны термомеханического упрочнения (ЗТМУ) может достигать 30 %, а при сварке труб из углеродистых сталей может быть выше. Протяженность отдельных участков зоны сварки зависит от исходных свойств металла, обусловленных технологией его изготовления, и режима сварки.

Как показали испытания стандартных образцов на статическое растяжение и изгиб, а также крупномасштабных образцов и сегментов труб, механическая неоднородность не отражается в целом отрицательно на прочности и пластичности сварных соединений [6, 11]. В этом случае узкий участок ЗС с пониженными механическими свойствами пластически деформируется за счет контактного упрочнения совместно с близлежащими участками ЗТМУ. В отличие от этого при определении ударной вязкости по стандартной методике (*KCV*) за счет высоких значений концентрации ($\alpha_{\sigma} = 3,45$) и градиента напряжений развитие пластических деформаций в процессе разрушения локализуется в пределах узкого участка металла ЗС, расположенного между участками ЗТМУ с повышенными прочностными свойствами. В результате в связи с малым объемом металла, участвующего в процессе пластического деформирования при ударе, энергозатраты на разрушение образца существенно снижаются по сравнению с однородным материалом [4, 5]. Об этом свидетельствует показанная на рис. 2, *а* поверхность излома такого образца без заметных боковых утяжек и низком значении ударной вязкости.

В то же время характер разрушения ударных образцов соединений КСО без искусственного механического концентратора в ЗС, но с характерными для КСО допустимыми дефектами принципиально отличается от описанного выше.

Изломы образцов с такими дефектами, расположенными у их поверхности, имели вид трапеции за счет значительных утяжек боковых граней (рис. 2, *б*), что существенно увеличивало затраты энергии на разрушение, которая согласно работе [5] обозначается символом *KD*. Результаты испытаний ударных образцов стандартного размера (10×10×55 мм) без надрезов со структурной неоднородностью различных размеров в ЗС по параметру *KD* оказались следующими: при 4,4×2,5 мм — 247,2 Дж; 4,0×3,5 мм — 261,6 Дж; 4,7×2,0 мм — 161,2 Дж, где первое значение соответствует линейному размеру дефекта на поверх-

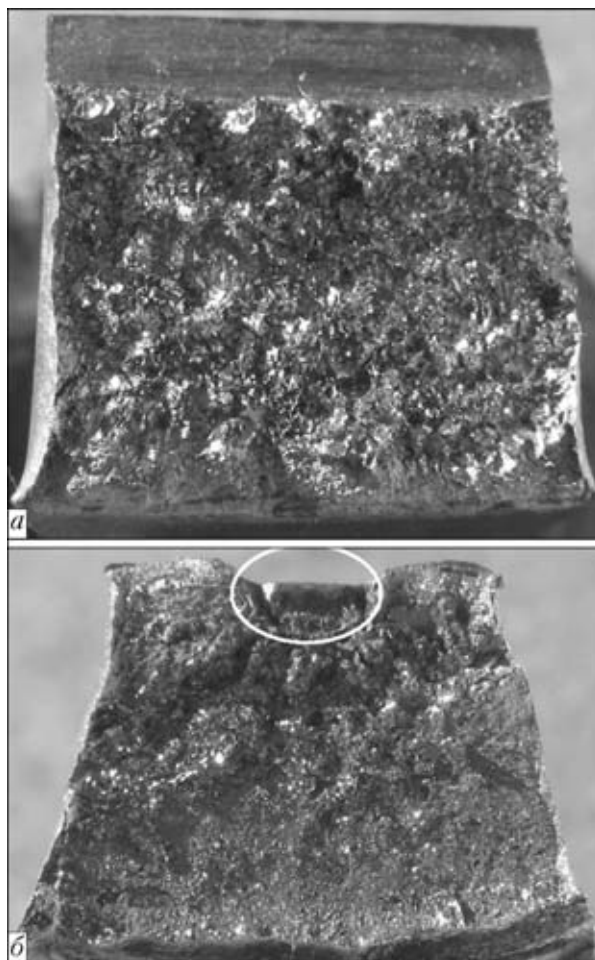


Рис. 2. Поверхности изломов ударных образцов сварных соединений после их испытаний в состоянии после сварки со стандартным механическим надрезом, *KCV* = 32 Дж/см² (*а*) и без искусственного надреза со структурной неоднородностью (обведено овалом), *KD* = 161 Дж (*б*)

ности ударного образца, а второе — то же, но вглубь образца.

Участки структурной неоднородности в ЗС, лежащие на некотором расстоянии от поверхности образца, практически не сказываются на результатах испытаний при ударном нагружении. Такие образцы не разрушались.

Таким образом, ударные испытания стандартных образцов с острым надрезом по ЗС не воспроизводят картину деформирования и разрушения сварного соединения с допустимыми дефектами, возможными при КСО.

Значения энергии разрушения для образцов с допустимыми дефектами (без искусственного надреза) значительно выше, чем у образцов из качественных соединений со стандартным надрезом в результате вовлечения в пластическое деформирование близлежащих к ЗС участков ЗТМУ, роль которого в процессе разрушения является определяющей. Это свидетельствует о том, что значения ударной вязкости сварных соединений КСО с острым надрезом по ЗС во многом определяются не свойствами металла соединения, а

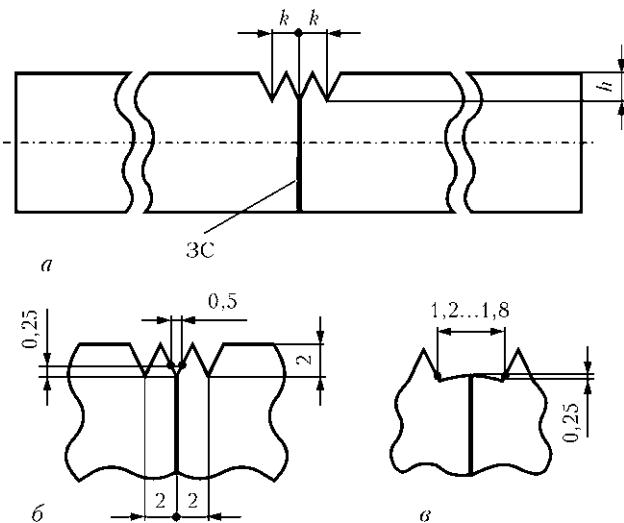


Рис. 3. Схема ударного образца *KCV*: *a* — расположение надрезов; *б* — участок образца с надрезами перед испытанием; *в* — центральный надрез после испытания

создаваемым в нем напряженным состоянием. Таким образом, значения ударной вязкости, получаемые на образцах со стандартным надрезом по ЗС, неадекватно отражают сопротивление разрушению сварного соединения с допустимыми дефектами КСО, следовательно, не могут служить надежным показателем его соответствия назначению.

Исходя из приведенного выше, можно дать однозначно утвердительный ответ на один из главных вопросов: действительно ли полученные значения ударной вязкости *KCV* металла сварных стыков, выполненных КСО, в состоянии после сварки достаточны для обеспечения надежной работоспособности трубопроводов в условиях эксплуатации. Здесь следует также учитывать, что показатели *KCV* коррелируют с характеристиками механики разрушения (K_{1c} , δ_c). Их требуемый уровень для предупреждения разрушений сварных соединений напрямую связывают с типом и размерами наиболее вероятных дефектов, свойственных принятому способу сварки, включая трещиноподобные, максимальные размеры которых обуславливаются разрешающей способностью используемых методов контроля. Следовательно, отсутствие опасных дефектов в металле соединений, выполненных КСО, гарантирует их неразрушимость при более низких показателях ударной вязкости по сравнению со способами сварки, когда в зоне сварки образуется литой металл. Это подтверждается многолетней промышленной эксплуатацией сварных трубопроводов, выполненных КСО.

Принимая во внимание известный факт, что «хрупкость не является свойством конструкционного материала и определяется не только его структурным состоянием, но и существенным влиянием конструктивно-технологических факторов ...» [12],

при оценке ударной вязкости соединений, выполненных КСО, важно создать такое напряженно-деформированное состояние в испытуемом образце, чтобы характер его деформирования и разрушения соответствовал образцам с допустимыми дефектами. При этом главным условием испытания является обеспечение совместного пластического деформирования металла ЗС и ЗТМУ. Такая задача может быть решена путем уменьшения глубины механического надреза вплоть до нуля (образцы без искусственного концентратора напряжения), изменения их количества и места расположения в сварном соединении.

В литературе есть пример локализации пластического деформирования и разрушения в заданном узком объеме испытуемого ударного образца путем нанесения двух дополнительных надрезов в плоскости расположения основного на прилегающих к нему боковых гранях. По форме и размеру дополнительные надрезы аналогичны основному [13].

В работе [14], отмечая практическую бездефектность стыков, выполненных КСО, для оценки их ударной вязкости предложено в стандартных образцах *KCV* снизить концентрацию напряжений за счет уменьшения глубины надреза. Проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона испытания при температуре 20 и -20 °С соединений, полученных КСО, труб большого диаметра из сталей различного класса прочности, при различных абсолютных значениях глубины надреза h с радиусом $r = 0,25$ мм в образцах стандартного размера, подтвердили перспективность такого подхода. С уменьшением глубины механического надреза до $h = 1$ мм показатели ударной вязкости повышаются более, чем в 2 раза по сравнению с надрезом $h = 2$ мм. Рост показателей происходит в результате увеличения объема металла, вовлекаемого в пластическую деформацию.

Для определения уровня вязких свойств металла сварных соединений, выполненных КСО, необходимо в стандартном образце исключить стеснение ЗС прилегающими к ней большими объемами более прочного металла ЗТМУ. С этой целью на участках ЗТМУ с повышенной твердостью наносили дополнительные, параллельно расположенные надрезу по ЗС «выравнивающие» канавки с геометрическими параметрами стандартного надреза.

На рис. 3, *a* представлена схема изготовления образцов из соединений, выполненных КСО, размером $10 \times 10 \times 55$ мм со стандартным надрезом по ЗС и с двумя дополнительными канавками. Такие канавки наносятся параллельно надрезу по ЗС на расстоянии $k = h$ (где k — расстояние между осями центрального и дополнительных надрезов) по обе стороны от его центра. В таком образце в соответствии с теорией Нейбера [15] взаимно снижается концентрация напряжений по сравнению с

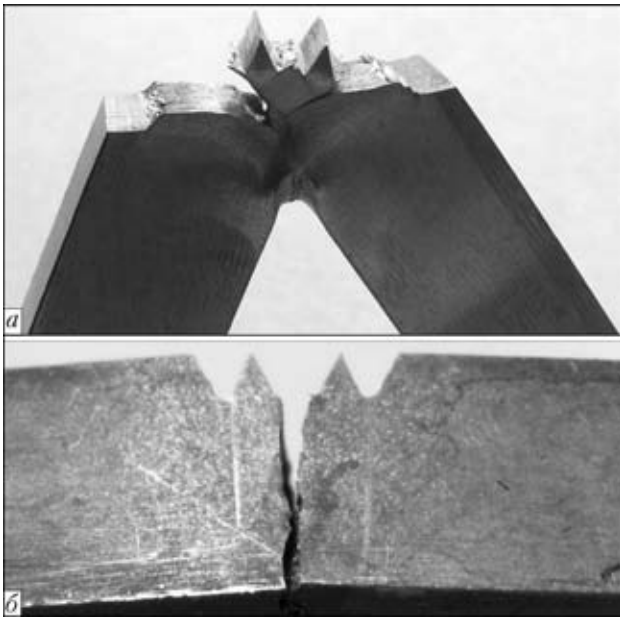


Рис. 4. Типичный характер разрушения образцов *K3V*, вырезанных из соединений, выполненных на оптимальном режиме (качественные соединения) (*а*) и на режимах с нарушением основных параметров (некачественные соединения) (*б*)

одним центральным надрезом и создаются практически равные условия пластического деформирования металла ЗС и ЗТМУ.

По аналогии с принятыми обозначениями энергии удара и ударной вязкости, отражающими тип концентратора *KV*, *KCV*, для предложенного образца с тремя надрезами введем символы *K3V* и *K33V*. На рис. 4, *а* показан типичный характер разрушения при ударных испытаниях образцов с тремя надрезами из качественных соединений КСО, показатели которых удовлетворяют требованиям нормативных документов, а на рис. 4, *б* — некачественных соединений, не удовлетворяющих этим требованиям. Энергии разрушения ударных образцов (с тремя надрезами глубиной 2 мм и радиусом 0,25 мм) сварных соединений трубной стали категории прочности Х70 в состоянии после сварки следующие, Дж:

$$\begin{aligned} &\text{у качественных соединений, выполненных на} \\ &\text{оптимальном режиме, при } T_{\text{исп}} = 20 \text{ }^\circ\text{C } K3V = \\ &= \frac{114,6 \dots 254,3}{177}, \text{ при } T_{\text{исп}} = -20 \text{ }^\circ\text{C } K3V = \\ &= \frac{112,8 \dots 214,4}{130}, \end{aligned}$$

у некачественных соединений, выполненных с нарушением режима (в изломах обнаружены недопустимые дефекты), при $T_{\text{исп}} = 20 \text{ }^\circ\text{C } K3V = \frac{4,8 \dots 21,0}{11,5}$. При испытаниях качественных сое-

единений, выполненных КСО, установлено, что зона сварки, включая ЗС и ЗТМУ, имеет в целом большую деформативную способность и, как следствие, высокие показатели ударной вязкости.

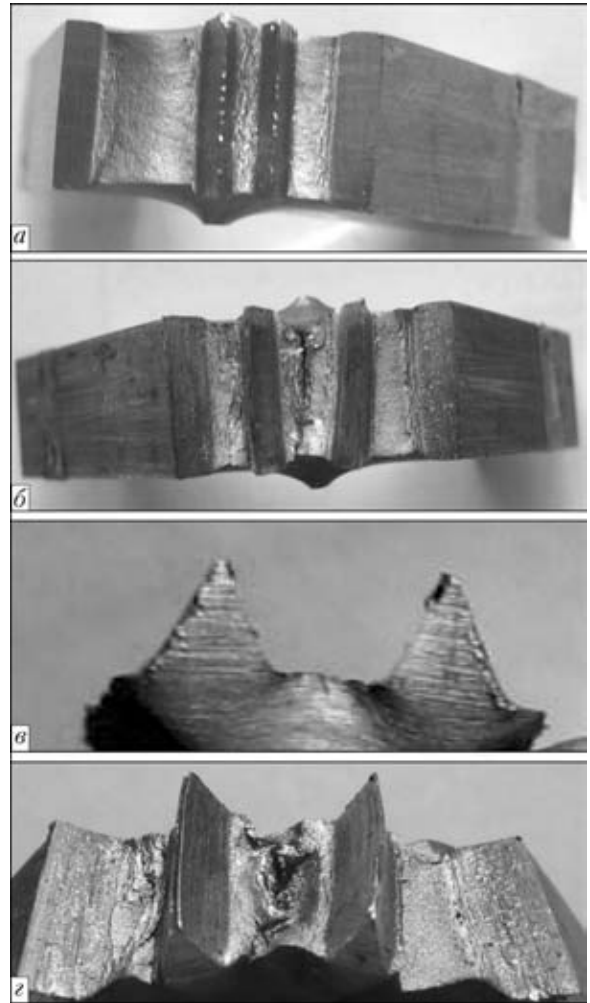


Рис. 5. Характер деформирования зоны центрального надреза образцов *K3V* с микро- (*а, в*) и макротрещинами (*б, г*): *а, б* — вид сверху; *в, г* — вид сбоку

При этом ЗС подвергалась значительной пластической деформации в условиях растяжения. Если до испытания расстояние между кромками надреза у его вершины в соответствии с радиусом ее закругления составляло 0,5 мм ($2r = 2 \times 0,25$), то после испытания оно увеличилось в 2,4...3,6 раза (см. рис. 3, *б, в*). Эти данные свидетельствуют о значительной пластичности металла ЗС и его достаточно высоком сопротивлении не только зарождению, но и развитию трещин. У некоторых образцов на дне центрального надреза по ЗС появлялись микро- и макротрещины (рис. 5), но дальнейшее развитие они не получили. К окончательному разрушению образца по механизму сдвига привели зародившиеся трещины в вершинах двух боковых надрезов (рис. 4, *а*).

Важно, что предложенный тип испытаний позволяет выявлять, наряду с неразрушающими методами контроля [16, 17], стыки с недопустимыми дефектами в ЗС. Такие образцы разрушаются только по центральному надrezу с низкими значениями энергии разрушения *K3V* (рис. 4, *б*).

При испытаниях образцов стандартного размера с тремя надрезами из качественных соединений ста-



ли класса прочности Х70 (образцы из сварных секторов труб поставки Харьцызского завода, с ударной вязкостью металла труб более 300 Дж/см² при 20 °С) в состоянии после сварки имели энергию, затраченную на разрушение (КЗУ), в среднем при температуре 20 °С — 177, при –20 °С — 130 Дж. Стандартные ударные образцы (с одним надрезом) тех же соединений при температуре 20 °С имели в среднем КУ около 30 Дж.

Выводы

1. Значения ударной вязкости, получаемые на стандартных образцах с острым надрезом КСУ по ЗС в состоянии после сварки, не отражают истинное сопротивление разрушению сварных соединений труб, выполненных КСО, с характерными допустимыми дефектами. В данном случае одним из факторов, определяющим уровень КСУ, являются не сами свойства металла зоны сварки, а его механическая разнородность.

2. Проведенные исследования с применением методики ударных испытаний образцов с тремя параллельными надрезами, изменяющие напряженно-деформированное состояние в зоне сварки, показали, что металл сварного соединения, выполненного КСО, в целом и все его зоны (ЗС и ЗТМУ) в состоянии после сварки имеют достаточно высокое сопротивление ударному нагружению.

3. Результаты исследований объясняют подтверждаемую практикой высокую эксплуатационную надежность сварных трубопроводов. Есть все основания отказаться от требований применения послесварочной термообработки соединений КСО, которую рекомендуют для повышения показателей ударной вязкости.

1. СП 105-34-96. Свод правил. Производство сварочных работ и контроль качества сварных соединений. — Введ. 01.10.96.
2. API STANDARD 1104. Welding of Pipelines and Related Facilities. — 19 ed., Sept. 1999.
3. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.

Peculiarities of formation of sound flash butt welded joints on pipes are analysed. Factors affecting the results of impact tests of standard specimens are considered. Tough properties of metal in the welding zone have been studied by using different impact test methods. It is shown that metal of the as-welded joint made under optimal parameters has sufficiently high resistance to impact loads. Conditions for performing flash butt welding and inspection of the joints providing high operating reliability of pipelines have been determined.

4. К методологии контроля соответствия назначению сварных соединений трубопроводов, полученных контактной сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян, Б. И. Казымов, В. И. Хоменко // Автомат. сварка. — 2006. — № 10. — С. 3–9.
5. Особенности испытаний на ударную вязкость сварных соединений труб, выполненных автоматической контактной стыковой сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. И. Кирьян, Б. И. Казымов, В. И. Хоменко // Там же. — 2008. — № 10. — С. 5–11.
6. Влияние дефектов контактной стыковой сварки на прочность соединений при низких температурах / С. И. Кучук-Яценко, Г. В. Жемчужников, Б. И. Казымов и др. // Там же. — 1980. — № 12. — С. 1–3.
7. Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1965. — 140 с.
8. Образование матовых пятен в соединениях, выполненных контактной стыковой сваркой / С. И. Кучук-Яценко, Б. И. Казымов, В. Ф. Загадарчук и др. // Автомат. сварка. — 1984. — № 11. — С. 23–26.
9. Патон Б. Е., Лебедев В. К., Кучук-Яценко С. И. Комплекс «Север-1» для контактной стыковой сварки неповоротных стыков труб большого диаметра // Там же. — 1979. — № 11. — С. 41–45.
10. Мазур И. И., Серафин О. М., Карпенко М. П. Электроконтактная сварка трубопроводов: пути совершенствования // Стр-во трубопроводов. — 1989. — № 4. — С. 8–11.
11. Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наук. думка, 1978. — 213 с.
12. Писаренко Г. С., Новиков Н. В. Об актуальных задачах исследований несущей способности криогенных сосудов давления // Пробл. прочности. — 1970. — № 8. — С. 3–12.
13. Бакин О. А., Кукин А. Г., Моношников А. Н. Метод оценки надежности материалов и сварных соединений, работающих в условиях низких температур // Там же. — 1970. — № 8. — С. 70–73.
14. Рахманов А. С., Зандберг А. С. Ударная вязкость как критерий оценки хрупкости соединений, выполненных контактной сваркой // Стр-во трубопроводов. — 1985. — № 10. — С. 41–43.
15. Нейбер Г. Концентрация напряжений. — М.: Гостехиздат, 1947. — 204 с.
16. Троицкий В. А., Радько В. П., Ющак П. Т. Ультразвуковой контроль качества соединений, выполненных контактной стыковой сваркой // Автомат. сварка. — 1981. — № 4. — С. 38–40.
17. Комплексный контроль соединений, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением / С. И. Кучук-Яценко, В. П. Радько, Б. И. Казымов и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 4. — С. 46–50.

Поступила в редакцию 15.07.2010



Международная специализированная выставка СВАРКА. УРАЛ/UralWeldExpo 2011

12–14 апреля 2011 года

Екатеринбург, КОСК «Россия»

Организатор: RTE group Екатеринбург

+7 (343) 310-32-47 (48, 49, 50); valentina@rte-ural.ru

RTE group Москва

+7 (495) 921-44-07; t.ruzavina@rte-expo.ru; www.uralwelldexpo.ru