



ТРЕЩИНЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА И МЕРЫ ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

А. А. РЫБАКОВ, Т. Н. ФИЛИПЧУК, Л. В. ГОНЧАРЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: rybakov@paton.kiev.ua

Рассмотрены случаи разрушения сварных магистральных газопроводов, в том числе после длительной эксплуатации, вызванные наличием трещиноподобных дефектов в сварных соединениях труб, образовавшихся при их изготовлении. Дан анализ основных причин возникновения таких дефектов в металле швов и зоне термического влияния с учетом особенностей технологических процессов производства и сварки труб. Показано, что трещины могут иметь различную ориентацию и происхождение, образовываться непосредственно в процессе сварки или на более поздних стадиях изготовления при выполнении смежных операций, например, экспандирования труб. Их образование обусловливается рядом причин технологического характера, например, перемещением свариваемых кромок труб в процессе сборки, некорректным выбором сварочных материалов (сварочной проволоки, флюса), локальным изменением химического состава металла шва или его структурной неоднородностью из-за попадания в шов экзогенных частиц, повышенной влажностью флюса и др. Описаны меры предупреждения образования трещиноподобных дефектов в сварных соединениях труб. Результаты исследований могут быть использованы в трубосварочном производстве для совершенствования технологии сварки и контроля трубной продукции, а также при обследовании трубопроводов в процессе их эксплуатации. Библиогр. 9, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: дуговая сварка, магистральные газонефтепроводы, сварные соединения, разрушения, трещины, причины образования, предупреждение

Как свидетельствуют статистические данные [1, 2], основными причинами аварий линейной части магистральных газонефтепроводов являются так называемые строительные (образовавшиеся при выполнении строительно-монтажных работ) и эксплуатационные (преимущественно коррозионные, в том числе стресс-коррозионные) дефекты. Считают, что разрушения трубопроводов, обусловленные строительными причинами, наиболее часты в начальный период их эксплуатации [2]. По мере увеличения длительности работы трубопроводов, напротив, существенно возрастает количество разрушений из-за коррозионных повреждений.

В то же время, как свидетельствуют расследования ряда отказов магистральных трубопроводов, в том числе после длительной эксплуатации, их разрушения могут быть связаны с дефектами, образовавшимися в процессе изготовления труб, в частности, наличием трещиноподобных дефектов в сварных соединениях.

Так, при аварии на газопроводе диаметром 820 мм, последствия которой показаны на рис. 1, очагом разрушения явилась протяженная трещина в заводском продольном шве трубы. Длина трещины составляла 850 мм, глубина 4...6 мм (рис. 2). По всей протяженности дефект не распространялся за пределы наружного шва. Повер-

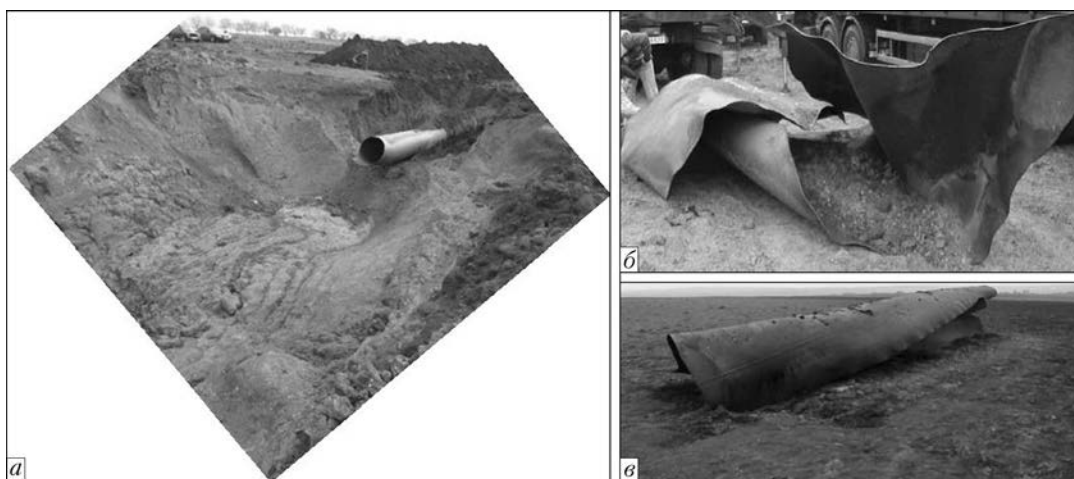


Рис. 1. Разрушение трубопровода (а) и фрагменты разрушившихся труб (б, в)

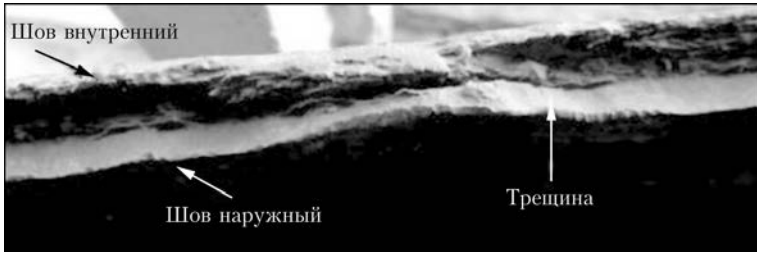


Рис. 2. Трещина в наружном продольном шве разрушившейся трубы диаметром 820 мм

хность трещины повреждена поверхностной коррозией, тогда как вне дефекта — в зоне развития разрушения (долома) коррозионные повреждения излома отсутствовали, что является дополнительным подтверждением образования трещины при изготовлении трубы. Разрыв трубопровода произошел после 35 лет его эксплуатации при давлении 4,5 МПа (рабочее давление газопровода 5,4 МПа). Трубы изготовлены из стали 17ГС толщиной 9 мм.

В сварном соединении магистрального газопровода диаметром 1420 мм, сооруженного в 1983 г. из труб с толщиной стенки 15,7 мм (сталь типа Х70), при внутритрубной диагностике выявлен дефект, классифицированный как «потеря металла». При контрольном шурфовании в продольном шве трубы обнаружена сквозная трещина, через которую вытекал транспортируемый газ (рис. 3). Истечение газа начиналось при давлении

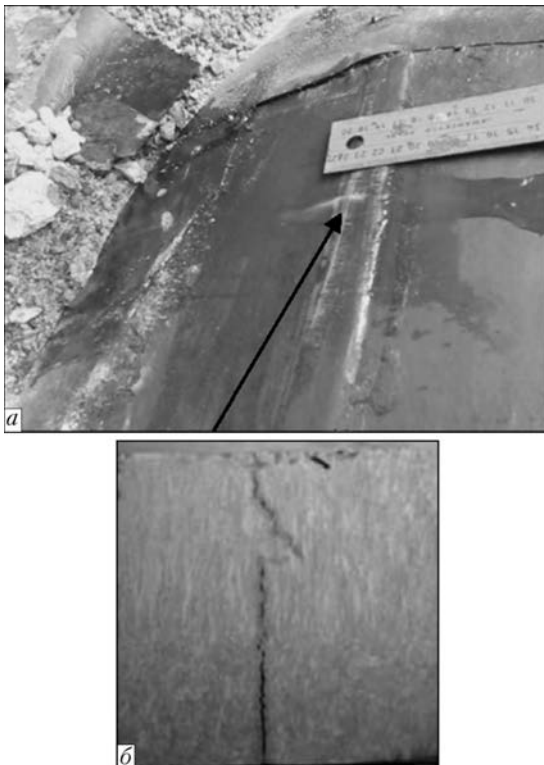


Рис. 3. Сквозная поперечная трещина в металле шва трубы диаметром 1420 мм: *a* — внешний вид трубы с трещиной в шве со стороны наружной поверхности; *б* — макрошлиф металла шва с трещиной (стрелкой обозначено истечение газа из трещины в продольном шве)

более 3 МПа, при меньшем давлении трещина закрывалась. Дополнительным неразрушающим контролем в этом же шве выявлена еще одна трещина, которая выходила на поверхность только внутреннего шва. Фрактографические исследования поверхности этих дефектов позволяют утверждать, что они также образовались в процессе изготовления трубы.

При гидравлических испытаниях вновь сооруженного нефтепровода произошло разрушение ряда труб размером 1220×19 мм из стали К60 (рис. 4). При этом зафиксировано давление 12,4 МПа (заводское испытательное давление 13,3 МПа). Трубы разорвались по околошовной зоне продольного заводского шва на длине примерно 1,6 м. Исследования на растровом микроскопе рельефа излома в зоне разрушения позволили установить, что оно развивалось от наружной поверхности трубы к внутренней, и, в основном, по вязкому механизму. Установлено, что причиной разрушений труб стали надрывы по зоне термического влияния продольного шва (рис. 4, б).

Таким образом, описанные случаи разрушений трубопроводов были вызваны наличием в сварных соединениях трещиноподобных дефектов, которые образовались еще на стадии производства труб. Ниже дан анализ условий и причин возникновения указанных дефектов в сварных соединениях труб с учетом применяемых технологических процессов их производства (здесь анализируются прямошовные трубы большого диаметра, сваренные дуговой сваркой под флюсом). Для удобства изложения материалов рассматриваемые дефекты условно объединены в отдельные

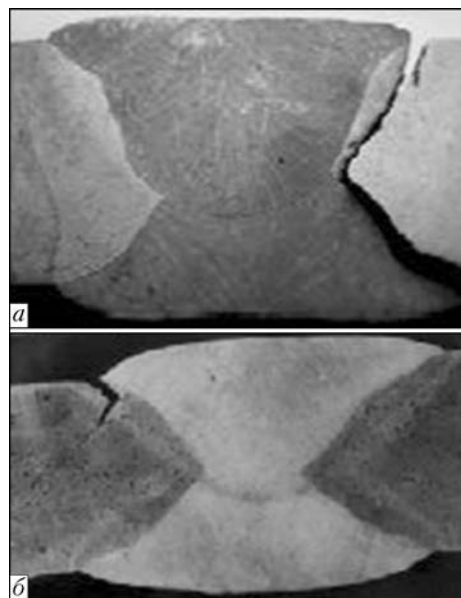


Рис. 4. Разрушение в околошовной зоне трубы диаметром 1220 мм: *a* — характер разрушения; *б* — надрыв в металле ЗТВ



группы, исходя из общих признаков и преобладающей причины их образования.

Продольные кристаллизационные трещины. Случаи образования трещин этого типа, аналогичных трещине, явившейся причиной описанного ранее отказа газопровода диаметром 820 мм, известны еще на ранней стадии освоения производства сварных труб большого диаметра [3]. Наиболее часто они возникали при применении устаревшей двухслойной технологии сварки. При такой технологии продольный шов прямошовной трубы сваривали в два слоя последовательно с наружной и внутренней поверхности трубы, причем первый, преимущественно наружный слой, выполняли в сборочно-сварочном стане в процессе сборки кромок трубной заготовки, что при чрезмерных деформациях этих кромок создает условия для образования продольных горячих кристаллизационных трещин. В 1960-х годах прямошовные трубы диаметром до 1220 мм изготавливали с применением такой технологии сварки и в больших количествах использовали для сооружения магистральных трубопроводов. На рис. 5 продольные трещины показаны на примере швов труб диаметром 820 мм из стали 14ХГС. На поверхности трещин видны грубые столбчатые кристаллиты, что подтверждает их горячее происхождение.

В начале 1970-х годов была разработана и реализована в трубосварочном производстве трехслойная технология сварки вначале спиральношовных, а затем прямошовных труб большого диаметра, при которой кромки трубных заготовок в момент их сопряжения свариваются в защитном газе сборочным (технологическим) швом [4]. Последний затем полностью пересваривается наружным и внутренним рабочими слоями, выполняемыми под флюсом. Такая технология позволила устранить образование в швах продольных трещин, связанных с перемещениями свариваемых кромок. Следует отметить, что современные нормативные документы предусматривают обяза-



Рис. 5. Продольная трещина в наружном шве трубы из стали 14ХГС, обусловленная действием преимущественно силового фактора: *а* — вид со стороны наружного шва; *б* — поверхность излома

тельное применение при сооружении ответственных газонефтепроводов труб, сваренных по трехслойной технологии с предварительным соединением кромок технологическим швом. Это же требование, на наш взгляд, следует оговаривать при заключении контрактов на поставку труб. Что касается старых трубопроводов, то в них возможность присутствия таких дефектов не исключена, в том числе из-за отсутствия в период их строительства достаточных средств неразрушающего контроля сварных соединений труб.

Продольные трещиноподобные дефекты, связанные с усадочной рыхлостью в швах. Дефекты этого типа (рис. 6) образуются при многоугловой сварке под флюсом с повышенной скоростью вследствие, как указано в работе [5], обособления хвостовой части сварочной ванны и кристаллизации последних порций жидкого металла в условиях затрудненной усадки. Глубина усадочных рыхлостей (показано стрелкой на рис. 6, *а*) обычно небольшая (0,3...0,5 мм). Однако трещины, которые иногда сопровождают рыхлость, могут иметь большую глубину. Такие трещины располагаются по центру шва и имеют, как и в предыдущем случае, межкристаллитный характер. В работе [5] показано, что вероятность образования

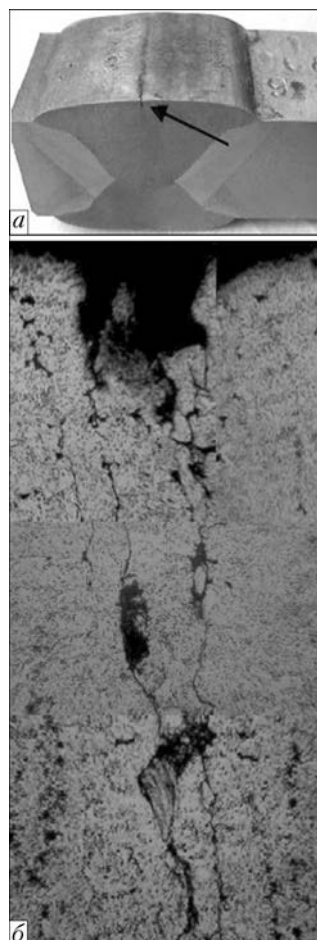


Рис. 6. Макрошлиф с усадочной рыхлостью по центру шва (*а*) и микроструктура ($\times 250$) этого участка (*б*)

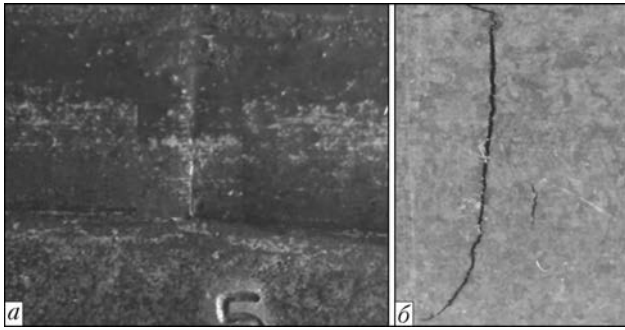


Рис. 7. Холодные поперечные трещины, образовавшиеся в швах со структурами закалочного типа: *а* — поперечная трещина на внешней поверхности шва; *б* — продольный макрошлиф

усадочной рыхлости возрастает с повышением скорости многодуговой сварки и применением плавящего флюса среднего и крупного гранулометрического состава. В случае использования при сварке труб агломерированного флюса усадочные рыхлости, как правило, отсутствуют.

Холодные поперечные трещины в швах могут образовываться вследствие воздействия двух основных факторов [6–8]: формирования в металле шва закалочных структур и/или наличия избыточного водорода. Вид холодной поперечной трещины в продольном шве трубы, обусловленной, преимущественно, структурным фактором, показан на рис. 7. Установлено, что трещины этого типа в металле шва труб из типовой микролегированной стали класса прочности К56-К65 возникают в связи с повышенным его легированием, в первую очередь марганцем, молибденом, ниобием, ванадием, что способствует образованию структур закалочного типа с высокой твердостью $HV_{49} = 280...350$. В двухсторонних сварных соединениях труб такие трещины чаще всего зарождаются в металле локальных хрупких зон первого шва с повышенной твердостью, образующихся при повторном нагреве во время выполнения второго шва. Разрушение имеет, преимущественно, внутрикристаллитный характер.

Особенности образования *холодных поперечных трещин водородного происхождения* исследовали на примере сварных соединений труб диаметром 914 мм из стали X65 (рис. 8). Трещины выходили на поверхности наружного, внутреннего или обоих швов. Особых отличий структуры в металле зоны образования трещин от обычной не выявлено. Структуры закалки в швах отсутствовали. Не выявлены также полигонизационные границы, которые могли бы свидетельствовать о повышенном микролегировании шва. Твердость по Виккерсу металла шва не превышала критический уровень с точки зрения трещинообразования ($HV_{49} = 260$). Вместе с тем исследованиями на растровом микроскопе выявлено сосредоточение мелких пор в зоне трещины, что свидетельствует о ее водородном происхождении (рис. 8). Аналогичные поры выявлены и в районе сквозной поперечной трещины, ставшей причиной отказа ранее упомянутого газопровода диаметром 1420 мм.

Данные работы [8] подтверждают представление о замедленном характере образования поперечных трещин водородного происхождения в металле швов труб. В связи с этим выявление их непосредственно в процессе изготовления труб затруднено.

При изготовлении труб наиболее вероятным источником повышенной концентрации диффузионно-подвижного водорода в металле швов является применение флюса повышенной влажности, а также ускоренное охлаждение сварного соединения перед выполнением ультразвукового контроля.

Трещины разной ориентации металлургического происхождения, обусловленные локальным изменением химического состава металла швов труб, могут образовываться из-за различных причин, в основном, вследствие попадания в шов экзогенных частиц. Например, известны случаи возникновения трещин в металле швов в связи с мес-

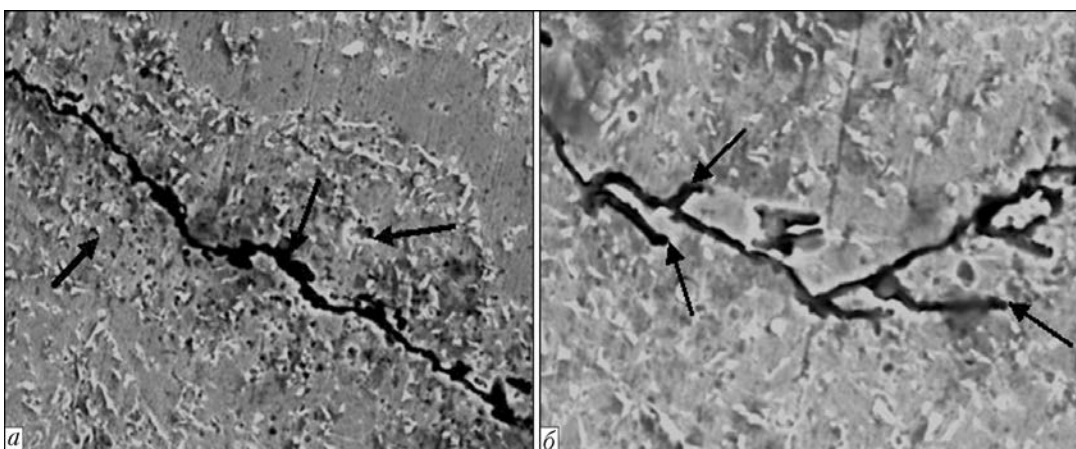


Рис. 8. Трещины водородного происхождения в металле шва трубы, выполненной под флюсом ($\times 1400$): *а* — скопление пор в зоне трещины; *б* — примеры торможения развития микротрещин порами



тным его обогащением углеродом, марганцем и формированием структурных составляющих с высокой твердостью. Такие трещины, в частности, выявляли в швах труб при использовании плавящего флюса АН-60 и АН-67Б из-за его загрязнения частицами футеровки печи в процессе изготовления [9]. Трещины этого типа разной ориентации располагались как в наружном, так и во внутреннем шве, имели нитевидный характер и, в основном, небольшие размеры, однако, в ряде случаев они распространялись на все сечение шва. Образование трещин в металле швов труб может быть вызвано также грубыми неметаллическими (шлаковыми) включениями экзогенного характера из загрязненного флюса при его повторном использовании и некачественной сепарации.

Зафиксированы случаи образования трещин в местах локального обогащения металла швов труб медью а иногда и цинком (рис. 9). Трещины зарождались в поверхностных слоях шва и развивались перпендикулярно его оси на глубину до 15 мм. Загрязнение металла шва указанными элементами может быть связано с оплавлением мундштуков или контактных плашек сварочных аппаратов, в том числе из-за нарушения стабильности многодугового процесса сварки под флюсом, например, при повышенном напряжении дуг, что приводит к шунтированию дуг шлаковой коркой. Образующиеся при этом трещины имеют относительно небольшие размеры, что затрудняет их выявление неразрушающими методами.

Трещины в ремонтируемых участках швов труб, где проводили исправление выявленных дефектов (пор, шлаковых включений, непроваров и др.) с предварительным их удалением и последующей многопроходной механизированной многослойной сваркой под флюсом, образуются, как правило, в связи с неблагоприятными структурными характеристиками металла «ремонтного» шва. Трещины развиваются преимущественно в продольном направлении, зарождаются, как правило, в последнем слое «ремонтного» шва, а затем распространяются в металле предыдущих слоев этого шва и ЗТВ.

Установлено, что исследуемые трещины могут быть отнесены к холодным, а их образование

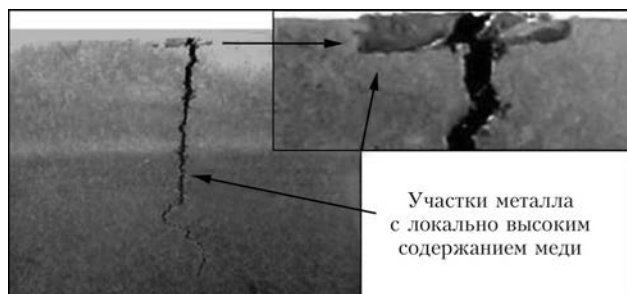


Рис. 9. Трещины в металле шва в участках локального обогащения медью (в правом углу фрагмент трещины, $\times 6$)

обусловлено постепенным увеличением от слоя к слою массовой доли легирующих элементов (марганца, кремния, молибдена, хрома и др.) при выполнении многопроходных швов сварочными материалами, обычно применяемыми для этих целей в трубном производстве. Например, в случае использования флюса АН-60 и проволоки Св-08Г1НМА для исправления дефектного участка продольного шва трубы из стали 10Г2ФБ содержание марганца в последнем (четвертом) слое «ремонтного» шва возросло до 1,97 %, кремния — до 0,98 %, а молибдена до 0,53 % (в первом слое этого шва количество указанных элементов находилось на уровне 1,69, 0,45 и 0,16 %, соответственно). Чрезмерный уровень легирования металла последних слоев шва приводило к формированию участков структуры верхнего бейнита с высокой твердостью, пониженной пластичностью и вязкостью, обогащению ферритной матрицы кремнием, также снижающим ее пластичность, образованию развитой системы полигонизационных границ с микротрещинами. Более подробно вопросы оптимизации химического состава и структуры металла в участках швов труб, подвергаемых ремонту, будут рассмотрены в наших дальнейших публикациях.

Трещины-надрывы в околошовной зоне сварных соединений, аналогичные приведенным на рис. 4, могут образовываться при выполнении операции экспандирования труб, необходимой для обеспечения требуемых их размеров. Возникновение таких трещин является следствием действия ряда факторов: чрезмерных отклонений профиля трубы в районе сварного соединения от круглой формы перед экспандированием, неплавного перехода от усиления шва к основному металлу и неблагоприятных структурных характеристик металла в участках, прилегающих ко шву, обусловленных сварочным нагревом. Чаще всего случаи образования трещин-надрывов наблюдаются в период освоения производства труб нового сортамента или более высокого уровня прочности. Небольшие размеры этих дефектов и расположение в районе геометрического концентратора затрудняет их выявление неразрушающими методами контроля. Именно трещины-надрывы в околошовной зоне, образовавшиеся при экспандировании труб, стали причиной рассмотренных ранее разрушений магистрального трубопровода диаметром 1220 мм.

Таким образом, изучение причин аварий магистральных трубопроводов и проведенные на трубосварочных заводах исследования технологических сварочных и смежных процессов позволили установить особенности расположения, причины и механизм образования трещиноподобных дефектов в швах труб, предназначенных для использования при сооружении магистральных тру-



бопроводов. С учетом этих данных разработан и частично реализован на действующих трубосварочных предприятиях комплекс мер по снижению вероятности возникновения таких дефектов и повышению достоверности методов контроля. Например, как отмечалось ранее, практически повсеместно при изготовлении труб ответственного назначения используется трехслойная технология сварки (с предварительным выполнением сборочного шва) взамен устаревшей двухслойной сварки. Сварку труб выполняют только под керамическим флюсом вместо плавленного, в котором возможно присутствие отслоившихся частичек футеровки печи и других посторонних частиц. На большинстве трубных заводов исключена операция ускоренного охлаждения швов перед УЗК. В значительной мере усовершенствованы оборудование и схема контроля сварных соединений труб, в том числе за счет увеличения количества УЗ-преобразователей и др. Более полный перечень мер, рекомендованных для предупреждения

возникновения трещиноподобных дефектов в швах труб большого диаметра, свариваемых дуговой сваркой под флюсом, приведен в таблице.

Вместе с тем для повышения гарантии отсутствия трещиноподобных дефектов в швах труб, на наш взгляд, помимо технологических мер и совершенствования средств и методов контроля, в нормативных документах Заказчика на трубы необходимо устанавливать дополнительные требования к технологическому процессу их производства, например, ограничение влажности флюса, введение норм предельно допустимых содержаний легирующих элементов в стали и металле швов, контроль применяемых сварочных материалов и формы трубной заготовки перед экспандированием, регистрацию параметров сварочного процесса и его аттестацию перед началом производства труб и др.

Результаты данных исследований могут быть использованы также для совершенствования методов диагностики магистральных трубопроводов.

Рекомендованные меры для предупреждения возникновения трещиноподобных дефектов в швах труб большого диаметра, свариваемых дуговой сваркой под флюсом

Типы трещин	Меры предотвращения образования трещин
Продольные кристаллизационные трещины в наружных швах, обусловленные действием преимущественно силового фактора	Применение трехслойной технологии сварки с предварительным соединением кромок труб сборочным (технологическим) швом Формовка трубных заготовок, исключающая чрезмерные деформации кромок при сборке
Продольные трещины в металле швов труб, связанные с усадочной рыхлостью	Улучшение формы шва (устранение «седловины», ограничение ширины шва) Ограничение угла наклона «на спуск» стана для сварки внутренних швов труб в пределах не более 20 мин. Применение керамического флюса Контроль качества флюса
Холодные поперечные трещины в металле швов водородного происхождения или обусловленные образованием закалочных структур	Контроль влажности флюса (влажность флюса должна быть не более 0,03 %) Ограничение легирования металла шва (в первую очередь молибдена не более 0,3 % и ниобия не более 0,03 %) Исключение операции ускоренного охлаждения УЗ-контролем сварных соединений (при необходимости этой операции время между окончанием сварки и началом охлаждения должно быть не менее 1 ч, а температура шва — не более 80 °С) Для новых марок трубной стали и сварочных материалов контроль твердости металла первого шва, в том числе с целью выявления в его корне локальных зон повышенной твердости (более HV 260)
Трещины различной ориентации металлургического происхождения в металле швов	Применение агломерированного флюса и контроль его качества Контроль качества поверхности сварочной проволоки Регистрация параметров сварочного процесса и контроль его стабильности Контроль состояния наконечников сварочных мундштуков
Трещины в ремонтных участках заводских швов, выполняемых с применением многослойной сварки	Применение сварочной проволоки с ограниченным количеством молибдена (до 0,3 %) и никеля (до 0,6 %), а также агломерированного алюминатно-основного флюса Аттестация процесса сварки для ремонта сварных соединений труб
Трещины-надрывы в околошовной зоне сварных соединений	Контроль трубной заготовки и формы сварного соединения перед экспандированием (отклонение профиля поверхности трубы от теоретического круга в районе сварного соединения не должно превышать 0,15 % D_n). Улучшение формы шва (например, угол перехода шва к основному металлу должен быть не менее 120°) Ограничение величины экспандирования (до 0,9 %), особенно для толстостенных труб повышенной прочности Дополнительное ограничение предельно допустимого содержания легирующих элементов, в частности, углерода (в зависимости от уровня прочности), молибдена (не больше 0,20 %), ниобия (не больше 0,05 %), в том числе для трубной стали повышенной прочности, например, X80



1. Кузнецов В. В., Ляпин А. А., Монахов Р. Е. Сравнительный анализ статистических данных по аварийности на магистральных трубопроводах в России и в Западной Европе // Нефть, Газ и Бизнес. — 2007. — № 1-2. — С. 49–56.
2. Мазур И. И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. — М.: Елима, 2004. — 1097 с.
3. Мандельберг С. Л., Рыбаков А. А., Сидоренко Б. Г. Стойкость сварных соединений трубных сталей против кристаллизационных трещин // Автомат. сварка. — 1972. — № 3. — С. 1–4.
4. Сварка в CO₂ сборочных швов прямошовных труб большого диаметра / С. Л. Мандельберг, А. А. Рыбаков, Л. И. Файнберг и др. // Там же. — 1972. — № 11. — С. 56–58.
5. Мандельберг С. Л., Семенов С. Е. Образование усадочных раковин на поверхности шва при многодуговой сварке под флюсом с повышенной скоростью // Там же. — 1962. — № 6. — С. 17–20.
6. Мандельберг С. Л., Буслинский С. В., Богачек Ю. Влияние водорода на образование холодных трещин в швах при сварке трубных сталей // Там же. — 1984. — № 2. — С. 2–5.
7. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. — М.: Машиностроение, 1981. — 248 с.
8. Гривняк И. Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 215 с.
9. Мандельберг С. Л. Многодуговая сварка на повышенной скорости с колебанием электрода // Автомат. сварка. — 1965. — № 2. — С. 8–13.

Поступила в редакцию 12.02.2013

Вагон габарита RIC — достойное пополнение номенклатурного ряда пассажирских вагонов отКВСЗ

На Крюковском вагоностроительном заводе прошло заседание межведомственной приемочной комиссии, на котором рассмотрены результаты испытаний пассажирского спального вагона локомотивной тяги модели 61-7034 для международного сообщения габарита RIC на тележках модели 68-7047 для железных дорог с шириной колеи 1520 мм и тележках модели 68-7044 для железных дорог с шириной колеи 1435 мм. Итогом проведенных испытаний стало подтверждение соответствия вагона заявленным характеристикам и безопасность его эксплуатации.

Межведомственная комиссия определила, что конструкция нового вагона повышенной комфортности на тележках с пневмоподвешиванием производства ПАО «КВСЗ» соответствует современному техническому уровню пассажирских вагонов. Было принято решение присвоить комплектам конструкторской документации на этот пассажирский вагон литеру 01 и разрешить Крюковскому вагоностроительному заводу изготовление опытной партии из 20 вагонов.

Новый этап в реализации проекта по модернизации вагонов Киевского метрополитена

После завершения всех процедур с японской стороной по запуску контракта Крюковский вагоностроительный завод получил авансовый платеж и начинает создание первого модернизированного поезда метро для Киевского метрополитена.

Кратко напомним суть дела: Киевская городская государственная администрация и ее глава Александр Попов предложили проект использования «зеленых инвестиций», которые Украина получает по Киотскому протоколу, — модернизировать 95 вагонов столичного метрополитена. Проект получил поддержку правительства. Не истратив ни одной копейки бюджетных средств, столичный метрополитен обновит подвижной состав Святошинско-Броварской линии, который на 90% состоит из морально и физически устаревших вагонов серии «Е», «Еж».

КВСЗ разрешили серийный выпуск новой цистерны

Вагон-цистерна модели 15-7076 предназначен для перевозки широкого спектра жидких (невязких) нефтепродуктов. Может эксплуатироваться по всей сети железных дорог Украины и государств-участников Содружества Советов по железнодорожному транспорту с шириной колеи 1520 мм. Вагон-цистерна имеет раму усиленной конструкции и котел повышенной прочности. Ходовая часть — две двухосные тележки модели 18-7055. Срок службы — 32 года. 28 февраля 2013 г. межведомственной приемочной комиссией было принято решение о ее постановке на серийное производство. Администрация и профсоюзный комитет КВСЗ подписали колдоговор.