



СКЛОННОСТЬ К ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕМОНТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

В. С. БУТ, С. Ю. МАКСИМОВ, О. И. ОЛЕЙНИК

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

Ремонт магистральных трубопроводов, находящихся под давлением, предполагает применение различных усиливающих сварных конструкций. Сроки эксплуатации магистралей во многих случаях превышают 30 лет, а материал труб может иметь неблагоприятную структуру, поэтому существует необходимость расширить представления об обеспечении технологической прочности сварных соединений в условиях ремонта. В работе приведены результаты исследования склонности сварных соединений низколегированных сталей к образованию холодных и слоистых трещин. Для этого были проведены эксперименты на технологических пробах, имитирующих реальные сварные соединения ремонтных конструкций. Показано положительное воздействие предварительного подогрева, послесварочного нагрева и термоотжигающего эффекта на стойкость к образованию холодных трещин, а также существенное влияние серы на склонность сталей к слоистому растрескиванию. Доказана возможность прогнозирования вероятности слоистого растрескивания по показателям относительного сужения, ударной вязкости и критического раскрытия трещины, а также по критическим напряжениям замедленного разрушения и фрактограммам поверхности излома основного металла. Библиогр. 18, табл. 2, рис. 12.

Ключевые слова: ремонтные сварные конструкции, магистральные трубопроводы, холодные трещины, слоистое растрескивание, термоотжигающий эффект, технологические пробы

Украина обладает мощным нефтегазовым комплексом, который позволяет стране играть важную роль в транспортировке энергоресурсов от поставщика к потребителю. Анализ структурного распределения магистральных газопроводов (МГП) Украины по протяженности показывает, что 23 % из них находится в эксплуатации более 40 лет, 32 % — от 30 до 40 и 45 % — до 30 лет [1]. Понятно, что для обеспечения надлежащего технического состояния и непрерывной работы трубопроводов в ближайшее время необходимо будет выполнить большой объем ремонтно-восстановительных работ.

Готовность к аварийным ситуациям и возможность действий в этих случаях является важнейшей проблемой с момента создания давления в трубопроводе и в течение всего срока его эксплуатации. В связи с этим для каждой аварийной ситуации или случая выявления недопустимых дефектов на линейной части трубопровода необходима стратегия ремонта, базирующаяся на следующих критериях: выбор метода ремонта, безопасность выполнения восстановительных работ, надежность ремонтных конструкций (отсутствие трещин), воздействие на окружающую среду, непрерывность транспортировки продукта, продолжительность ремонта, экономическая целесообразность. При этом преимущество следует отдавать методам ремонта без остановки эксплу-

атации трубопровода, чтобы исключить уменьшение объема перекачиваемого продукта или значительно сократить его в течение небольшого промежутка времени, а также не нанести существенного материально-финансового и экологического ущерба.

Для Украины такие методы имеют особое значение с учетом большой плотности населения в зоне расположения МГП, высоких цен на газ и необходимости безусловного выполнения контрактных обязательств по поставке газа как отечественным, так и зарубежным потребителям.

Проведенная диагностика технического состояния МГП ПАО «Укртрансгаз» выявила на линейной части обширные коррозионные повреждения, которые составляют около 50 % от общего количества обнаруженных дефектов, отдельные участки с расслоением металла, а также недопустимые по действующим нормативно-техническим документам дефекты в кольцевых сварных соединениях [2], которые, как правило, образуются в замыкающих стыках («захлестах») при строительстве трубопроводов.

На основании анализа характера и геометрических параметров выявленных дефектов ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ был предложен структурный подход к разработке технологий восстановления несущей способности линейной части МГП под давлением с применением дуговой сварки [3]. Методы ремонта были сгруппированы по видам де-

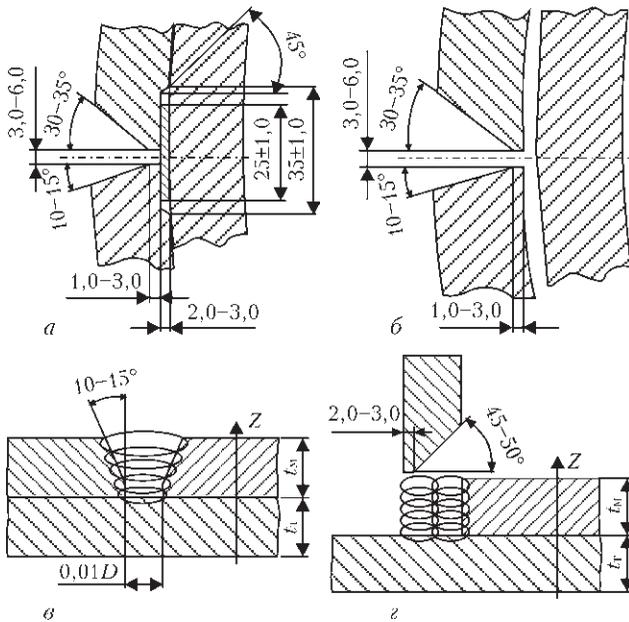


Рис. 1. Типовые сварные соединения в ремонтных конструкциях, устанавливаемых на МГП в условиях эксплуатации: а, б — продольный стык муфты; в — нахлесточно-стыковое соединение; з — соединение патрубков-муфта

фектов и целевому назначению [4]. Для каждой группы были определены безопасные условия выполнения дуговой сварки с учетом рабочих параметров транспортировки газа, геометрических характеристик магистрали, механических свойств металла труб и типа сварного соединения.

Большинство предложенных методов ремонта линейной части МГП в условиях эксплуатации [4] предусматривает применение усиливающих конструктивных элементов с типовыми сварными соединениями (рис. 1). Перед тем, как рекомендовать разработанные технические решения к практическому применению, необходимо было определить условия обеспечения технологической прочности сварных соединений, т. е. исключить трещинообразование. Частично результаты исследований в этом направлении представлены в работе [5], где акцентировалось внимание на оценке конструкционной прочности сварных соединений усиливающих элементов с трубопроводом. Данная работа посвящена технологическим аспектам свариваемости трубных сталей.

Стойкость сварных соединений к образованию холодных трещин. Способность сварных соединений без разрушения (образования холодных трещин) выдерживать термомеханическое

воздействие во время дуговой сварки штучными электродами оценивали на образцах трубных сталей типовых марок 17Г1С и Х60, которые широко применялись в строительстве МГП в 80-е годы прошлого века. Это дало возможность наиболее приближенно имитировать реальные сварные соединения ремонтных конструкций [4]. Так, для продольных стыков муфт (рис. 1, а, б) это была технологическая проба Теккен; для нахлесточно-стыковых соединений конструктивных элементов с трубопроводом (рис. 1, в) — проба Имплант; для соединений патрубков-муфта (рис. 1, з) — проба «окно»; для ремонтной конструкции «заплата-муфта» — круговая проба. Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1.

Для сравнительного анализа сталей с учетом условий предварительного подогрева, обеспечивающих требуемую стойкость к трещинообразованию, были проведены эксперименты на пробах Теккен [6] из пластин толщиной 16 мм, т. к. прокат большей толщины пока не применяется для изготовления усиливающих конструктивных элементов [7]. Для определения температуры предварительного подогрева к поверхности пластин вблизи скоса кромок приваривали термпары. Сварку контрольного участка соединения выполняли электродами с основным типом покрытия УОНИ-13/55 диаметром 3 мм и электродами с целлюлозным покрытием Lincoln Electric Shield-Arc 65 диаметром 3,2 мм при исходной температуре основного металла 20, 50, 100, 150 и 200 °С. После сварки из контрольного участка вырезали макрошлифы для оценки наличия/отсутствия трещин. Относительную протяженность трещин определяли с помощью микроскопа МБС-2 как отношение длины трещины в шве к общей длине шва.

На основании проведенных исследований построены графические зависимости относительной протяженности трещин $L_{тр}$ от температуры предварительного подогрева $T_{п}$ (рис. 2). Они показали, что сварные соединения стали Х60 более склонны к образованию холодных трещин, чем выполненные из стали 17Г1С. Применение электродов с целлюлозным типом покрытия значительно снижает трещиностойкость обоих сварных соединений из-за высокого содержания диффузионного водорода, которое может достигать в наплавленном металле

Таблица 1. Химический состав исследуемых трубных сталей

Сталь	Состав, мас. %									C _{экв} , %
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	V	Nb	
17Г1С	0,170	0,467	1,60	0,06	0,05	0,025	0,036	0,02	0,005	0,46
Х60	0,121	0,219	1,54	0,10	0,05	0,011	0,027	0,04	0,051	0,41
Плавка № 47	0,160	0,292	1,50	0,12	0,16	0,045	0,008	0,02	0,005	0,45
Плавка № 65	0,148	0,179	1,49	0,11	0,07	0,030	0,007	0,02	0,005	0,33

* Углеродный эквивалент рассчитывали по формуле $C_{экв} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$.

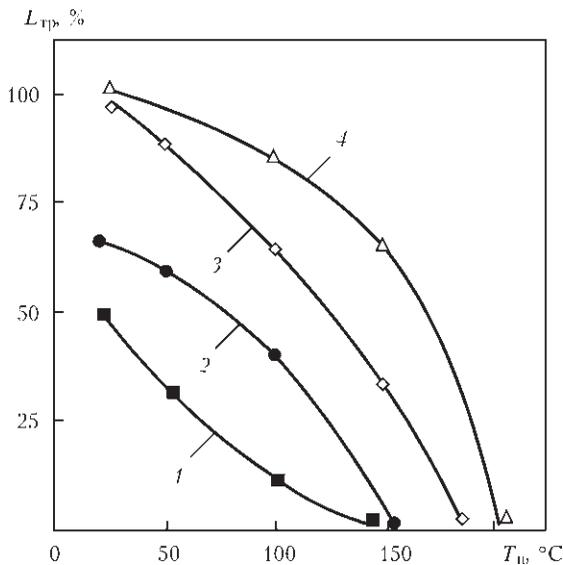


Рис. 2. Зависимость длины трещин от температуры предварительного подогрева, типа покрытия электрода и марки стали для контрольного шва пробы Теккен: 1, 3 — сталь 17Г1С; 2, 4 — X60; 1, 2 — электроды УОНИ 13/45; 3, 4 — Shield-Arc 65

40 см³/100 г [8]. Согласно методике Теккен оптимальная температура предварительного подогрева для предотвращения образования холодных трещин в реальных сварных соединениях выбирается по критерию суммарной длины трещины 50 % в контрольном шве. Таким образом, при сварке электродами с основным типом покрытия $T_{п} = 20...50$ и $70...100$ °C для стали соответственно 17Г1С и X60, а при использовании электродов с целлюлозным покрытием температура предварительного подогрева будет выше на $60...80$ °C (см. рис. 2).

С целью определения условий трещинообразования в сварных соединениях ремонтной кон-

струкции «заплата-муфта» [4] исследования проводили на круговой пробе (образце Марин Морского департамента США) по методике работы [6]. Минимальный диаметр пробы составлял 100 мм, ширина муфты — 500 мм. Результаты исследования влияния зазора a между стыкуемыми элементами конструкции и погонной энергии сварки q на склонность к образованию холодных трещин представлены на рис. 3, а. Наличие/отсутствие трещин определяли на поперечных макрошлифах, вырезанных из замыкающей четверти кругового шва, где создаются наиболее высокие растягивающие напряжения при усадке металла шва. Было очевидно, что трещина зарождается у концентратора напряжений — в месте перехода наплавленного металла к основному (рис. 3, б), и именно в зонах концентрации растягивающих напряжений резко повышается содержание диффузионного водорода, способствующего зарождению холодных трещин [9].

Из рис. 3 ясно, что с увеличением зазора в разделке и соответственно с повышением тепловложения при выполнении корневого прохода протяженность трещин уменьшается. При $a > 8$ мм в сварных соединениях стали X60 трещины практически не образуются. Для исключения вероятности образования холодных трещин в металле шва круговой пробы из стали 17Г1С достаточно $a > 6$ мм. Причем коэффициент формы шва $K_{ш}$ при максимальном трещинообразовании близок к единице, а при отсутствии трещин $K_{ш} \sim 4$. Как известно, сопротивление швов образованию холодных трещин зависит также от структуры их металла, которая определенным образом взаимосвязана с коэффициентом формы шва [10].

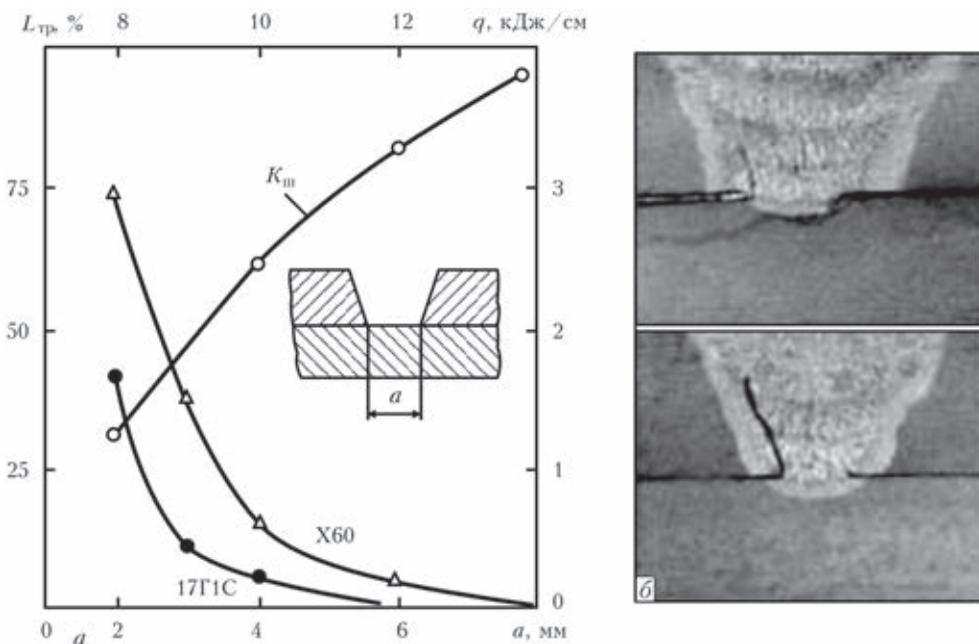


Рис. 3. Условия трещинообразования в круговой пробе (a) и область зарождения трещины (δ)

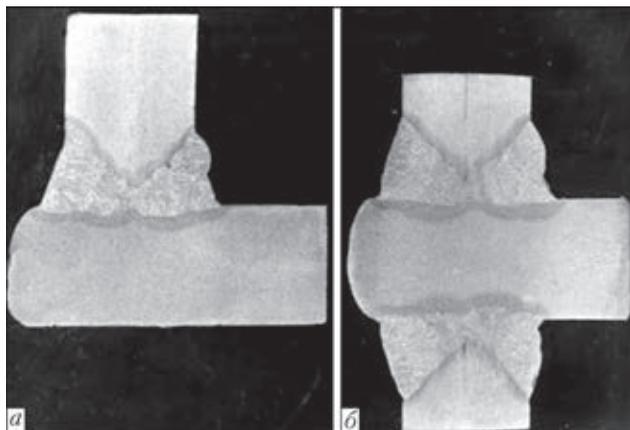


Рис. 4. Макрошлифы сварных соединений для изготовления составных образцов Имплант с надрезом параллельно прокатке для испытаний на растяжение по оси Z (а); на ударную вязкость и критическое раскрытие трещины (б)

Следует отметить, что при проведении испытаний на образцах Марин не учитывался эффект дополнительного охлаждения сварных соединений в процессе сварки за счет транспортируемого по трубопроводу продукта. Поэтому при установке таких ремонтных конструкций на МГП вблизи компрессорных станций, в условиях интенсивного теплоотвода движущимся с высокой скоростью газом, очевидно, потребуется предварительный подогрев до 100...150 °С.

Наиболее эффективным методом оценки стойкости сварных соединений низколегированных сталей к образованию холодных трещин, на наш взгляд, является Имплант [11]. Эта методика учитывает практически все факторы, вызывающие образование холодных трещин, а именно: малопластичную структуру металла ЗТВ, высокий уровень растягивающих напряжений, наличие концентратора напряжений и значительное содержание диффузионного водорода. Высокие растягивающие напряжения, которые создаются у концентраторов геометрического происхождения (это, например, межслойный зазор в нахлесточно-стыковых соединениях усиливающих элементов с трубопроводом), даже при незначительном содержании водорода могут привести к возникновению холодных трещин и дальнейшему разрушению сварных соединений при длительном нагружении.

Эксперименты проводили согласно рекомендациям МИС [11] для двух вариантов. В первом случае образцы вырезали из пластин сталей 17Г1С и Х60 вдоль прокатки с целью исследования влияния структурного фактора, диффузионно-подвижного водорода и техники сварки на критические напряжения при замедленном разрушении сварных образцов на испытательной машине АИМІ-5. Во втором случае образцы Имплант вырезали из тавровых соединений (рис. 4) всех исследуемых

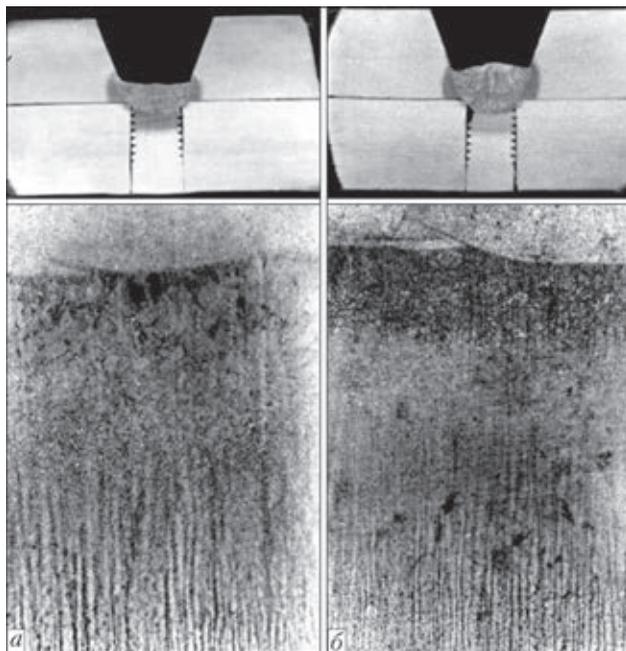


Рис. 5. Одно- (а) и двухпроходная (б) сварка образцов Имплант для получения соединений, имитирующих реальные сталей для изучения влияния диффузионного водорода и вредных примесей (серы) на склонность к образованию холодных трещин при действии напряжений в направлении, перпендикулярном текстуре металла.

Сварку образцов, имитирующих реальные сварные соединения ремонтных конструкций (рис. 5), выполняли штучными электродами с основным и целлюлозным покрытием диаметром 3,0 и 3,2 мм на режиме $I_{св} = 110...120$ А, $U_d = 24...26$ В, $v_{св} = 1,9...2,5$ мм/с, обеспечивающем погонную энергию $q = 0,8...1,2$ кДж/мм. При двухпроходной сварке термоотжигающий слой наплавляли на погонной энергии в 1,4...1,7 раза выше, чем при однопроходной сварке. После охлаждения металла шва до 100 °С образцы подвергали постоянному нагружению на стандартной машине.

За критерий оценки стойкости сварных соединений к образованию холодных трещин принимали критические напряжения, под действием которых трещины не появляются в образце в течение 16 ч. Содержание диффузионного водорода в металле шва определяли хроматографическим методом [12] на образцах, выполненных в идентичных условиях.

Установлено, что в соединениях, сваренных электродами Shield-Arc 65, содержание диффузионно-подвижного водорода $[H]_{диф} = 19...24$ см³/100 г. В свою очередь, электроды УОНИ 13/55 после прокатки при 380...400 °С обеспечивают уровень 5,0...7,4 см³/100 г, а без прокатки (после выдержки на воздухе с относительной влажностью 90 % более 3-х суток) отмечено значительное повыше-

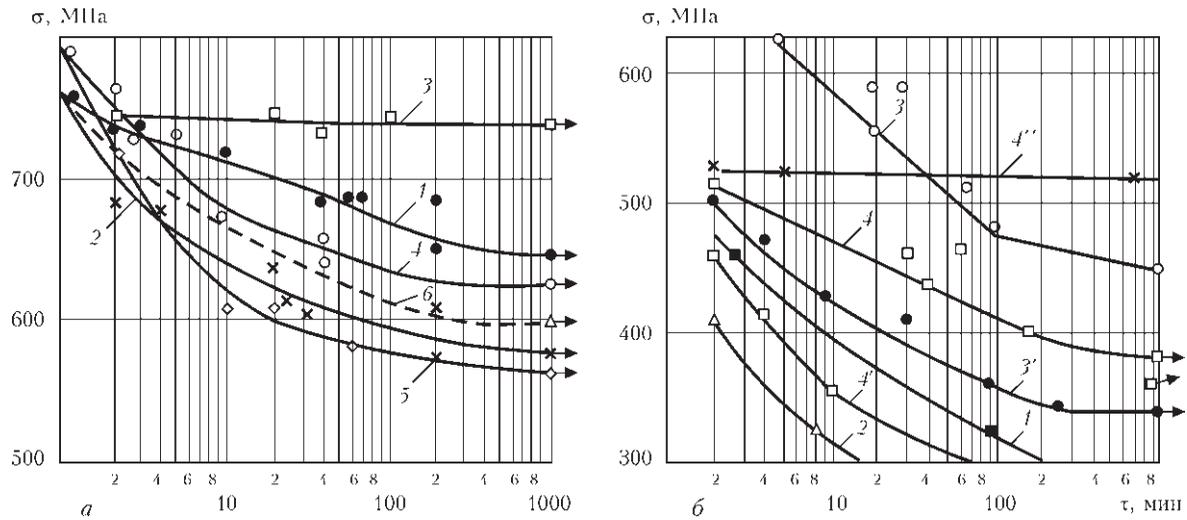


Рис. 6. Результаты испытаний образцов Имплант на длительную прочность при действии нагрузки вдоль прокатки (а) (1, 4 — электроды УОНИ 13/55 после прокатки, $[H]_{\text{диф}} = 4,0 \dots 7,4 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; 2, 5 — Shield-Arc 65, $[H]_{\text{диф}} = 19 \dots 24 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; 3 — термоотжигающий проход; 4, 6 — УОНИ 13/55 без прокатки, $[H]_{\text{диф}} = 12 \dots 16 \text{ см}^3/100 \text{ г}$; 1–3, 6 — сталь 17Г1С; 4, 5 — X60) и по оси Z (б) (1 — плавка № 65; 2 — № 47; 3 — сталь X60; 4 — 17Г1С; 1–4, 4'' — электроды УОНИ 13/55; 3', 4' — Shield-Arc 65; 4'' — нагрев после сварки)

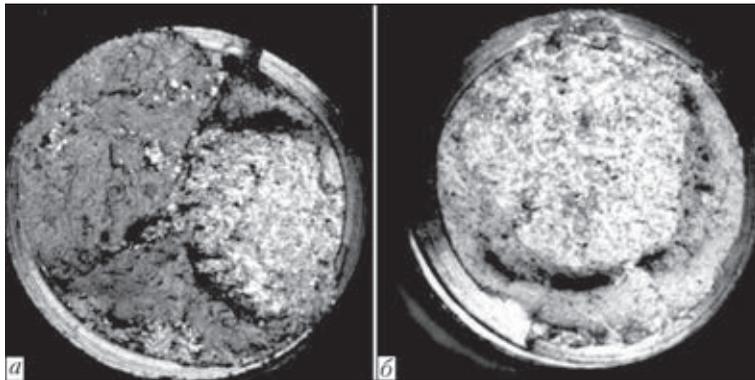


Рис. 7. Поверхность изломов ($\times 10$) образцов Имплант из стали X60, выполненных электродами Shield-Arc 65: а — $\sigma = 615 \text{ МПа}$, $\tau = 40 \text{ мин}$; б — $\sigma = 565 \text{ МПа}$, $\tau = 100 \text{ мин}$

ние содержания водорода в наплавленном металле — до $[H]_{\text{диф}} = 12 \dots 16 \text{ см}^3/100 \text{ г}$.

По результатам испытаний сварных образцов Имплант, вырезанных из исследуемых сталей вдоль прокатки, построены графические зависимости изменения напряжений замедленного разрушения во времени для разного содержания диффузионного водорода в наплавленном металле, а также для случая применения термоотжигающего слоя (рис. 6, а). Эти графики подтвердили протекание замедленного разрушения в образцах, сваренных за один проход, и ведущую роль водорода в этом процессе. С повышением содержания диффузионного водорода снижается критическое напряжение разрушения, а также сокращается время инкубационного периода зарождения трещины. Это хорошо иллюстрирует поверхность изломов образцов Имплант (рис. 7). Применение электродов с основным типом покрытия без прокатки (см. рис. 6, а; кривая б) приводит к снижению трещиностойкости соединений почти до уровня значений, полученных при применении электродов с

целлюлозным покрытием (кривая 2). Использование термоотжигающего эффекта при наплавке второго слоя шва (кривая 3) позволяет снизить вероятность замедленного разрушения благодаря улучшению микроструктуры ЗТВ (см. рис. 5, б) и, очевидно, снижению содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле.

При проведении испытаний образцов с механическим надрезом, выполненным вдоль прокатки (рис. 8, а), исследовали комбинированное влияние водорода и неметаллических включений (по содержанию серы) на сопротивляемость трещинам. Для этого помимо серийных трубных сталей использовали опытные плавки низколегированных сталей ИЭС им. Е. О. Патона (см. табл. 1), химический состав которых изменяли за счет содержания основных легирующих элементов (углерода, кремния, марганца), а также серы.

Результаты испытаний составных образцов Имплант показали (рис. 6, б), что характер сопротивляемости трубных сталей замедленному разрушению существенно изменился по сравнению со случаем действия нагрузки вдоль прокатки (рис. 6, а). Сварные соединения стали X60 (рис. 6, б; кривые 3, 3') демонстрируют большее сопротивление образованию трещин, чем соединения стали 17Г1С (кривые 4, 4'). Это, на наш взгляд, связано с меньшим содержанием серы и отсутствием строчечной структуры основного металла, хотя в целом абсолютные значения критических напряжений замедленного разрушения были значительно ниже, чем для образцов Имплант с надрезом поперек прокатки металла. Характер

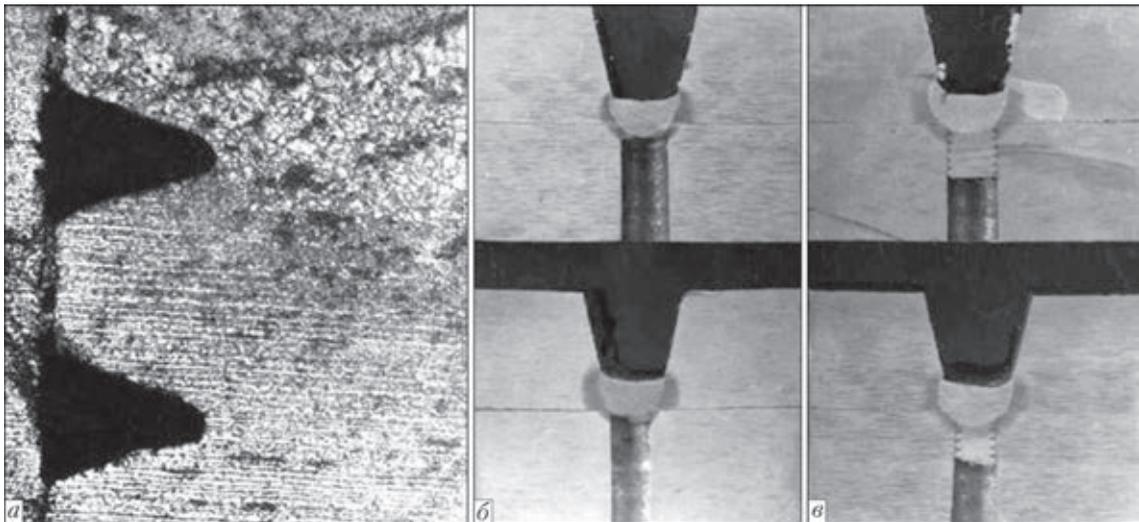


Рис. 8. Расположение надреза в ЗТВ образца Имплант (*a* — $\times 63$), разрушение по ЗТВ (*б*) и основному металлу (*в*)

разрушения образцов из стали 17Г1С с высоким содержанием диффузионного водорода в наплавленном металле после проведенного нагрева и выдержки при 150 °С в течение 16 ч иллюстрирует рис. 8, б, в. Заметим, что после удаления водорода из ЗТВ образцы разрушались по основному металлу в сечениях, ослабленных неметаллическими включениями (рис. 8, в), критические напряжения разрушения находились на достаточно высоком уровне (см. рис. 6, б, кривая 4''), разрушение образцов при исходном содержании диффузионного водорода проходило по ЗТВ (рис. 8, б).

При действии напряжений по толщине металла (надрез параллелен прокатке) проявляется совместное негативное влияние диффузионного водорода и неметаллических включений (сульфидов) на сопротивление сварных соединений замедленному разрушению. Водород накапливается в содержащих включения пустотах, преобразуясь из атомарного в молекулярный, и созда-

ет в них высокое давление, тем самым облегчая разрушение металлической матрицы при малых радиусах кривизны краев включений (значительной концентрации напряжений на границе матрица–включение). Это подтверждается результатами испытаний других опытных сталей с различным содержанием серы (см. рис. 6, б; кривые 1, 2) и фрактографического анализа поверхности излома образцов Имплант (рис. 9) на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-35CF. Исследования показали, что для образцов из стали 17Г1С характерна крупнозернистая структура, содержащая сульфидные и сульфосиликатные неметаллические включения эллипсоидной, глобулярной и пластинчатой формы (рис. 9, а). Сталь Х60 имеет мелкозернистую структуру с незначительным количеством неметаллических включений глобулярной формы размером менее 2 мкм (рис. 9, б). На поверхности изломов стали плавки № 47 с наибольшим содержанием серы (см. табл. 1) наблю-

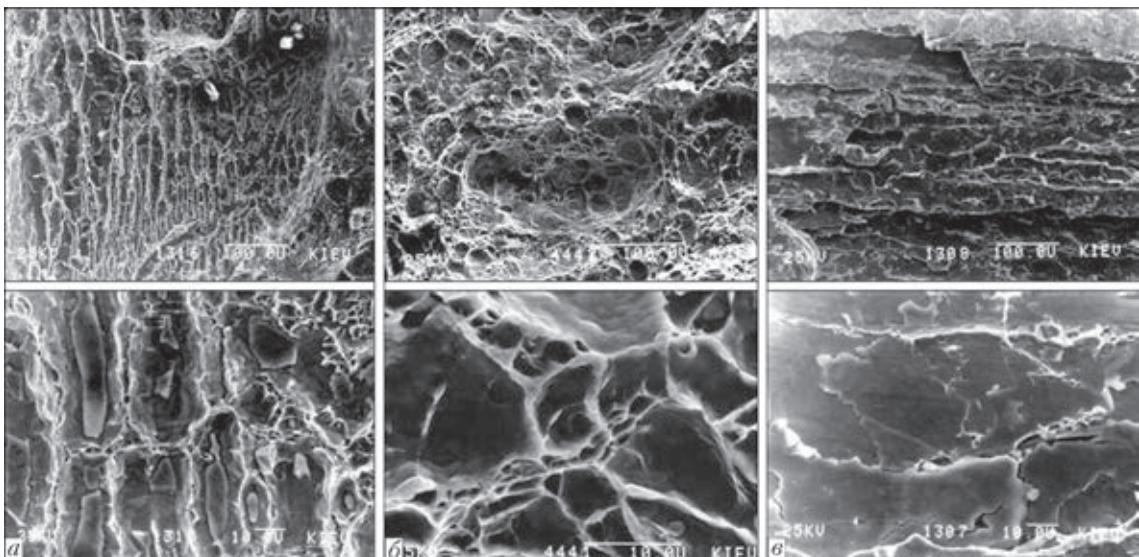


Рис. 9. Фрактограммы поверхности изломов образцов с разрушением по оси Z: *a* — сталь 17Г1С; *б* — Х60; *в* — плавка № 47 (верхний ряд — $\times 300$, нижний ряд — $\times 3000$)



дается значительное количество неметаллических включений пластинчатой формы (рис. 9, в).

Таким образом, подводя итоги испытаний сварных образцов на стойкость к образованию холодных трещин, можно сделать следующие выводы. Во-первых, для ремонтных работ на действующих МГП следует применять электроды с основным покрытием, обеспечивающие низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле. Во-вторых, нужно использовать термоотжигающий эффект второго прохода многослойного шва, который улучшает микроструктуру ЗТВ и способствует частичной эвакуации водорода из проблемной зоны. В-третьих, необходимо проводить послесварочный нагрев соединений, в которых в дальнейшем нагрузки могут действовать в направлении, перпендикулярном текстуре металла трубы. И, наконец, в условиях интенсивного теплоотвода на ремонтируемом участке МГП требуется традиционный предварительный подогрев до 100...150 °С.

Оценка склонности сварных соединений стали к слоистому растрескиванию. Одним из распространенных видов трещин в сварных конструкциях является слоистое растрескивание. Определение склонности материала к образованию слоистых трещин — важный аспект оценки свариваемости низколегированных сталей. Ступенчатая форма трещин и их расположение, в основном вне ЗТВ, позволяет отличать эти трещины от холодных. Характерно, что такие меры предосторожности, как предварительный подогрев и использование электродов с низким содержанием водорода, которые являются эффективными для предотвращения образования холодных трещин, незначительно влияют на вероятность возникновения слоистых трещин.

Как показывает мировой опыт, в нахлесточно-стыковых и тавровых сварных соединениях низколегированных сталей возможно образование слоистого растрескивания при действии растягивающих напряжений по толщине проката. Эта проблема актуальна и для сварных соединений конструкций (усиливающие муфты, тройники), установленных на МГП в условиях эксплуатации, поскольку при снижении внутреннего давления в трубопроводе в кольцевых нахлесточно-стыковых соединениях возникают значительные радиальные напряжения, что связано с различной деформационной способностью сварных оболочек.

Известно [13], что на склонность сварных соединений к слоистому растрескиванию влияют следующие факторы:

– высокое содержание неметаллических включений типа сульфидов и окисульфидов марганца и железа;

– неблагоприятная морфология неметаллических включений;

– ослабление матрицы металла из-за высокого содержания неметаллических включений в одной плоскости проката;

– значительная протяженность границ сплавления вдоль прокатки (параллельно текстуре металла);

– действие напряжений по толщине проката (оси Z).

Для сравнительной оценки склонности основного металла к слоистому растрескиванию дополнительно были использованы стали разных классов прочности (20, 09Г2С, Х70). Эксперименты проводили на цилиндрических составных образцах с рабочей частью диаметром 6 мм, которые изготавливали из крестообразных сварных соединений (см. рис. 4, б), из стали каждой марки изготавливали по 6 образцов и испытывали их при одноосном растяжении, когда на исследуемом участке металла напряжения действуют по оси Z. После разрушения цилиндрических образцов измеряли относительное сужение ψ на стыке изломов согласно методике [13]. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Для наглядности по средним значениям относительного сужения была построена гистограмма распределения сталей по этому показателю (рис. 10). Наибольшей пластичностью при действии напряжений по толщине листа, а, значит, и меньшей склонностью к слоистому растрескиванию обладают стали 20, Х60, Х70, наименьшей — 17Г1С и опытные плавки № 65 и 47.

Фрактограммы изломов образцов Имплант, разрушенных по основному металлу, также характеризуют пластичность стали в направлении оси Z. Используя критерии, предложенные в работе [13], полученные результаты можно оценить следующим образом (табл. 2): образование слоистых трещин в сварных соединениях сталей 20 и Х70 маловероятно ($\psi \geq 25\%$); для сталей 17Г1С, 09Г2С

Таблица 2. Результаты испытаний составных образцов на склонность к слоистому растрескиванию

Сталь	σ_b , МПа	ψ , %
17Г1С	504...546	11,0...17,6
	516	14,7
Х60	572...580	20,2...26,0
	574	23,2
Плавка № 47	420...480	6,1...11,3
	452	7,4
Плавка № 65	464...510	10,0...14,2
	485	13,0
20	466...480	22,1...30,6
	469	25,7
09Г2С	470...492	19,0...27,2
	481	20,3
Х70	642...660	21,6...28,2
	648	26,1

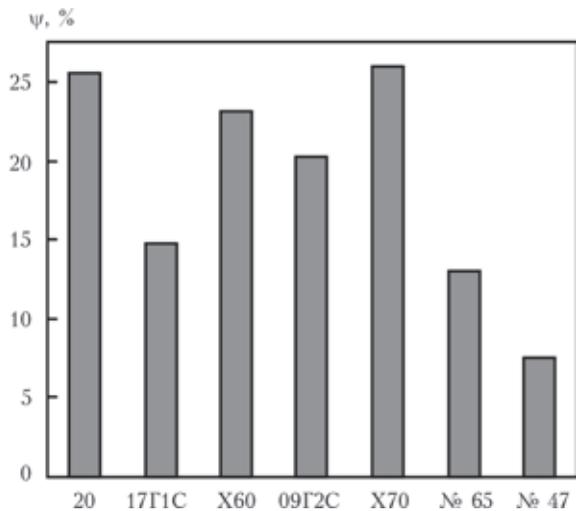


Рис. 10. Распределение сталей по показателю склонности к слоистому растрескиванию в зависимости от относительного сужения по оси Z

и X60 требуется проверка на контрольных жестких соединениях типа «окно» ($15 \leq \psi < 25\%$); стали плавки № 47 и 65 склонны к слоистому растрескиванию и не рекомендуются для изготовления ответственных сварных конструкций ($\psi < 15\%$).

Было изучено влияние содержания серы на физико-механические свойства металла при выполнении надреза параллельно прокатке, что также характеризует склонность сталей к слоистому растрескиванию [14]. Оценку вязкости проводили на образцах Менаже при ударном нагружении, а склонность к хрупкому разрушения — на образцах, позволяющих регистрировать критическое раскрытие трещины (КРТ) при трехточечном изгибе. Все образцы вырезали из крестообразных сварных соединений (см. рис. 4, б). Результаты испытаний составных образцов представлены

на рис. 11. Видно, что ударная вязкость металла снижается с повышением в нем содержания серы, особенно при отрицательных температурах (рис. 11, а). Что касается трубных сталей, то X60 имеет более высокие характеристики, чем 17Г1С, которая содержит большее количество серы (см. табл. 1). Это еще раз подтверждает выводы работы [14], что содержание серы в стали выше 0,012 % приводит к снижению надежности сварных конструкций.

Изготовление и испытание образцов для определения КРТ выполняли согласно методике [15]. По КРТ, которое характеризует сопротивление металла хрупкому разрушению при статическом трехточечном нагружении образцов с надрезом, параллельным прокатке, получены аналогичные температурные зависимости (рис. 11, б). Из графиков видно, что сталь плавки № 47 (кривая 2) с высоким содержанием серы имеет очень низкие значения КРТ при трехточечном изгибе во всем температурном диапазоне испытаний и по критерию стойкости металла к хрупкому разрушению ($\delta_c > 0,12$ мм) не может применяться для изготовления ответственных сварных конструкций. Сталь плавки № 65 (кривая 1) при условии действия растягивающих напряжений по толщине листа может эксплуатироваться только при положительных температурах, сталь 17Г1С (кривая 4) — до -15°C , X60 (кривая 3) — до -40°C .

Для проверки склонности сварных соединений к слоистому растрескиванию была выбрана сталь 17Г1С, имеющая промежуточные показатели вязкости и пластичности из полученных на всех составных образцах. Из нее изготовили образец, свариваемый в паз на жесткой пластине толщиной 25 мм и размером 300×300 мм из стали

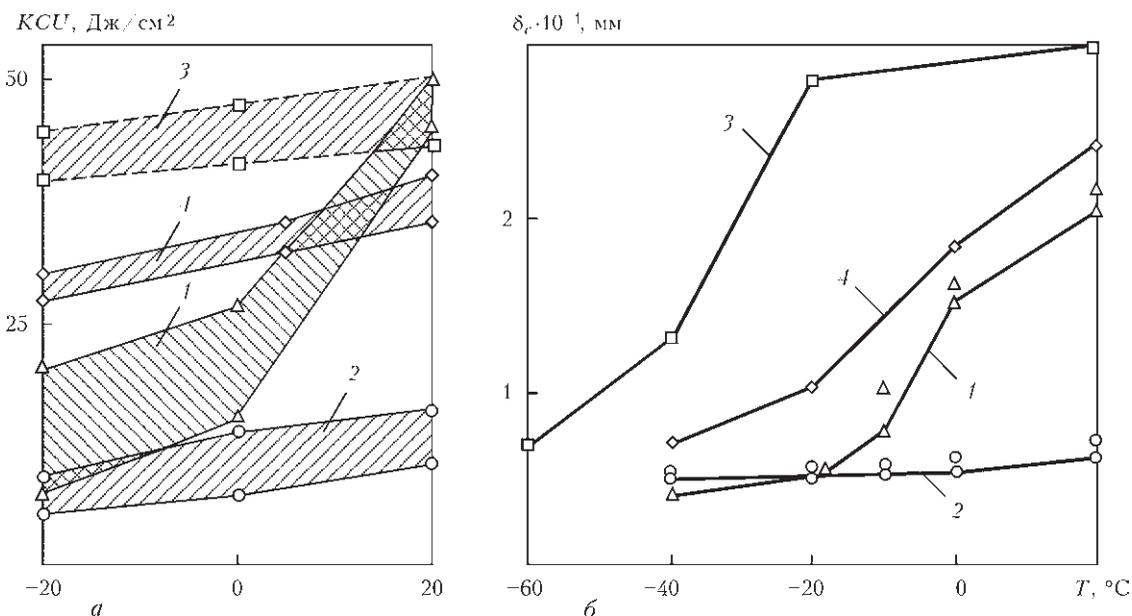


Рис. 11. Вязкость образцов с надрезом параллельно прокатке при ударном нагружении (а) и трехточечном изгибе (б): 1 — плавка № 65; 2 — № 47; 3 — сталь X60; 4 — 17Г1С

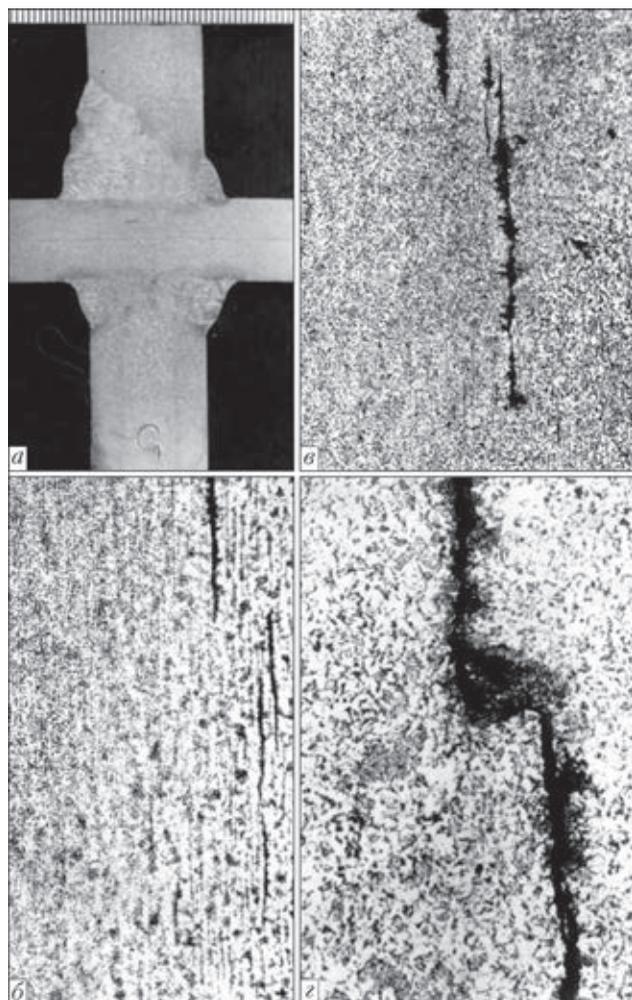


Рис. 12. Макрошлиф пробы «окно» (а), образование слоистых трещин в основном металле (б — $\times 100$) и ЗТВ (в — $\times 100$; г — $\times 500$)

09Г2С. Эта проба, согласно [16], имеет название «окно» и позволяет создавать в исследуемом металле высокий уровень растягивающих напряжений по толщине проката при усадке замыкающего многослойного шва в V-образной разделке. Макрошлиф этого сварного соединения и образование в нем слоистых трещин показаны на рис. 12. Трещины находятся в основном металле, ЗТВ и на некотором удалении от нее. Видно, что раскрытие трещины произошло в местах расположения цепочки неметаллических включений неблагоприятной пластинчатой формы с острыми краями.

Таким образом, для трубопроводов, изготовленных из сталей подобного химического состава, после приварки ремонтных конструкций без остановки эксплуатации недопустимы значительные перепады внутреннего давления или же при установке усиливающих элементов необходимо предусматривать конструктивно-технологические меры, снижающие вероятность слоистого растрескивания. Наиболее эффективным способом уменьшения склонности к слоистому растрескиванию является регулирование содержания

серы в стали при выплавке путем введения редкоземельных металлов, которые не только являются активными раскислителями, но и связывают серу в мелкодисперсные глобулярные частицы оксисульфидов и сульфидов, равномерно распределенные в стали. Как уже упоминалось, остаточное содержание серы в стали не должно превышать 0,012 %, а соотношение РЗМ:S \geq 4:1 [14].

Ремонтные работы выполняются на давно построенных МГП, использованная для них трубная сталь не совсем благоприятна по химическому составу с точки зрения свариваемости, так что сварщикам остается применять конструктивно-технологические меры предупреждения слоистого растрескивания ремонтных конструкций. Одним из таких подходов, апробированным на практике, является предварительная наплавка буферного слоя металла меньшей прочности, чем металл шва, которая легла в основу технического решения присоединения отводов к действующим МГП [17]. Еще одним эффективным решением при ремонте можно считать предварительную выборку поверхностного слоя стенки трубы с последующим заполнением канавки сварочным материалом, обеспечивающим прочность шва на уровне значений металла трубы [18].

В этой связи перспективным будет проведение исследовательских работ по оценке эффективности локального переплава поверхностного слоя стенки трубы, находящейся под давлением, аргоно-дуговым или плазменным методом с целью уменьшения содержания неметаллических включений в выполняемых сварных соединениях и, следовательно, снижения вероятности слоистого растрескивания.

Выводы

1. Сравнительные испытания с использованием пробы Теккен показали более высокую трещиностойкость сварных соединений стали 17Г1С, чем стали Х60. Установлено, что при сварке электродами с основным типом покрытия для предотвращения образования холодных трещин температура предварительного подогрева должна составлять 20...50 °С для стали 17Г1С и 70...100 °С для стали Х60. При использовании электродов с целлюлозным покрытием температуру необходимо повышать на 60...80 °С.

2. Испытания образцов Имплант с надрезом параллельно и поперек прокатки показали различия в сопротивляемости сталей замедленному разрушению. В первом случае вследствие совместного негативного влияния диффузионного водорода и сульфидных включений стойкость к образованию холодных трещин стали Х60 была выше, чем стали 17Г1С. Во втором случае сталь 17Г1С име-



ла более высокие значения критических напряжений разрушения.

3. По результатам испытаний образцов на растяжение по оси Z проведена градация исследуемых сталей по склонности к слоистому растрескиванию в зоне соединения в зависимости от содержания серы.

4. Установлена возможность прогнозирования вероятности слоистого растрескивания по следующим показателям: относительное сужение по оси Z; ударная вязкость и критическое раскрытие трещины на образцах с надрезом параллельно прокатке; критические напряжения замедленного разрушения; фрактограммы поверхности излома основного металла.

5. С целью снижения риска образования холодных трещин при выполнении ремонтных работ на действующих МГП необходимо применять электродные материалы, обеспечивающие низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, использовать термоотжигающий эффект от последующего прохода многослойного шва, проводить послесварочный нагрев сварного соединения в случае действия нагрузок в направлении, перпендикулярном поверхности трубы.

6. Для предотвращения слоистого растрескивания в ремонтных конструкциях на магистральных трубопроводах целесообразно предварительно выполнять наплавку буферного слоя металлом меньшей прочности или выборку поверхностного слоя стенки трубы с последующим ее заполнением сварочным материалом, обеспечивающим равнопрочность сварного соединения.

1. Бут В. С., Грецький Ю. Я., Розгонюк В. В. Обґрунтування нового підходу до виконання зварювальних робіт на трубопроводах під тиском // Нафт. і газ. пром-ть. – 2001. – № 4. – С. 33–39.
2. Дрогомирецький М. М. Внутрішньотрубна діагностика магистральних газопроводів і ремонт виявлених дефектів // Сб. тр. научн. семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта» (Киев, 11 апр. 2006 г.). – Киев: Экотехнология, 2006.

3. Бут В. С., Олейник О. И. Основные направления развития технологий ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации // Автомат. сварка. – 2007. – № 5. – С. 42–48.
4. ГБН В.3.1-00013741-12:2011: Магистральные газопроводы. Ремонт дуговой сваркой в условиях эксплуатации. – Введ. 06.09.2011. – Киев: Мин-во энергетики и угольной пром. Украины, 2011. – 152 с.
5. Бут В. С., Олейник О. И. Оцінка технологічної та конструкційної міцності зварних з'єднань ремонтних конструкцій на магистральних трубопроводах // Сб. тр. Междунар. научно-практ. конф. «Остаточный ресурс и проблемы модернизации систем магистральных и промышленных трубопроводов» (Киев, 12–13 апр. 2011 г.). – Киев: ЦТТ ИЭС им. Е. О. Патона, 2001.
6. Шориоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И. Испытания металлов на свариваемость. – М.: Металлургия, 1972. – 218 с.
7. ТУ У 27.2-19305558-001:2007. Елементи трубопроводів підсилюючі конструктивні. – Чинні від 03.07.07. – 79 с.
8. Kobelco Welding Today. – 1998. – 2, № 2.
9. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
10. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
11. Recommendation for the use of Implant test as a complementary information test on the cold cracking susceptibility during the welding of steels / H. J. Granjon // IIW Doc. IX 830–73.
12. ГОСТ 23338–91: Сварка металлов. Методы определения содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и металле шва. – Введ. 01.07.1992. – М.: Госстандарт СССР, 1991. – 20 с.
13. Suzuki H. Weldability of modern structural steels in Japan // Trans. Iron and Steel Inst. of Japan. – 1983. – 23, № 3. – P. 189–204.
14. Вихлевицук В. А., Черногрицкий В. М., Федорова И. П. и др. Повышение надежности сварных конструкций путем снижения содержания серы в стали // Автомат. сварка. – 1989. – № 4. – С. 1–6.
15. Кирьян В. И. Методика оценки сопротивления конструкционных сталей вязким разрушениям // Там же. – 1984. – № 11. – С. 1–6.
16. Farrar J. C. M., Dolby R. E., Baker R. G. Lamellar tearing in welded structural steels. – Weld. J. – 1969. – № 7. – P. 274–282.
17. Пат. 40033 Украина, F16L 41/00. Способ присоединения отвода к действующему газопроводу / В. С. Бут, Я. С. Марчук, А. С. Мандра. – Оpubл. 25.03.2009; Бюл. № 6.
18. Пат. 11796 Украина, F16L 55/16, E21F5/00. Процесс ликвидации технологических отверстий в магистральных трубопроводах / В. С. Бут, С. Ю. Максимов, О. И. Олейник и др. – Оpubл. 16.01.2006; Бюл. № 1.

Поступила в редакцию 05.06.2014

Разработано в ИЭС

ДУГОВАЯ НАПЛАВКА СТАЛЬНЫХ ВАЛКОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Широкий ассортимент порошковых проволок (ПП-Нп-25Х5ФМС, ПП-Нп-35В9Х3СФ, ПП-АН132, ПП-АН147), разработанных в ИЭС специально для наплавки валков, дает возможность выбрать оптимальный состав наплавленного металла исходя из конкретных условий работы валков, характера и интенсивности их износа, обрабатываемости наплавленного металла, цены и др. Количество повторных наплавов — 4...5 раз. Благодаря этому многократно увеличивается срок службы валков и сокращается их расход.



Автоматическая дуговая наплавка валка пильгер-стана на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе