



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ БАНДАЖЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Э. Ф. ГАРФ, д-р техн. наук, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, Р. И. ДМИТРИЕНКО, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Ю. В. БАНАХЕВИЧ, канд. техн. наук (ГК «Укртрансгаз», г. Киев),
А. В. САВЕНКО, И. Н. ОЛЕЙНИК, инженеры (ООО «Кайлас», г. Киев)

Приведены результаты испытаний труб 720×10 и 530×8 мм с композитно-полимерными бандажами в участках с дефектами, имитирующими локальные коррозионные повреждения. Показана совместная работа бандажа и трубы при статических и циклических нагрузках, вызываемых внутренним давлением. Установлена эффективность усиления композитно-полимерными бандажами дефектных участков трубопроводов и отмечены особенности разрушения трубы с бандажом.

Ключевые слова: трубопровод, дефектные участки, восстановление прочности, композитный полимерный бандаж, внутреннее давление, испытания, напряжения, деформация

Проблема обеспечения надежности трубопроводов, длительное время находящихся в эксплуатации, требует наличия конструктивных решений и технологий их осуществления, направленных на повышение прочности отдельных участков, имеющих повреждения. Эта проблема особенно актуальна для Украины, на территории которой эксплуатируется только магистральных нефте-, газо- и продуктопроводов свыше 42 тыс. км.

Ремонт участков трубопроводов, имеющих локальные коррозионно-механические повреждения, может осуществляться с использованием конструктивно-технологических решений, реализуемых либо с помощью сварки либо с применением высокопрочных неметаллических материалов [1]. Часто при этом одним из условий является выполнение ремонтных работ без прекращения эксплуатации трубопровода. В полевых условиях, вдали от источников энергоснабжения для ликвидации локальных дефектов, как правило, преимущество отдают наложению бандажей из неметаллических материалов. Простота технологии установки бандажей с применением высокопрочных неметаллических материалов и их небольшая масса являются решающими преимуществами при выборе технологии ремонта трубопроводов в горной местности на скалистых грунтах.

В мировой практике исследования в области использования композитных материалов при ремонте нефте- и газопроводов проводятся в течение последних 20 лет [2]. Имеются исследовательские программы, финансируемые компаниями, эксплу-

атирующими трубопроводы, и производителями труб, реализация которых позволила включить композитные материалы в технологии ремонта трубопроводов. Создана нормативная база на ремонт трубопроводов неметаллическими композитными системами в полевых условиях [3]. Расширяется номенклатура используемых композитных материалов [2].

В Украине для локального ремонта трубопроводов используют композитные бандажи ППС фирмы «Полипромсинтез», изготавливаемые на основе стеклопластиков и полиэфирной смолы. Выполнен большой объем исследований по расчетной оценке прочности системы трубопровод — композитный бандаж, изучению механических свойств композитного бандажа, разработке конструктивно-технологических схем усиления дефектных участков трубопроводов. К сожалению, использование композитных материалов на основе стеклопластиков и полиэфирных смол не имеет хорошо отработанной и стабильной технологии. Широкая гамма композитов и технологических приемов, высокая чувствительность механических свойств к изменению технологических параметров требует при проектировании композитных бандажей принимать во внимание технологические особенности материалов и особенности выполнения ремонтных работ [1].

В России для локального ремонта трубопроводов получают распространение композитные полимерные бандажи (КПБ). Нормативными документами [3] оговорены дефекты в трубах, пригодные для ремонта КПБ, материалы, рекомендуемые для заполнения дефектов и используемые в качестве адгезивов, материалы, воспринимающие нагрузку от внутреннего давления, и напол-

нителю. Сформулированы технические требования к этим материалам и технологии нанесения КПБ.

Вместе с тем увеличение конструктивно-технологических решений по усилению трубопроводов КПБ и расширение номенклатуры используемых материалов не сопровождается увеличением объемов исследований совместной работы трубы и бандажа. Существенное различие модулей упругости, а также механических и деформационных свойств материалов трубы и композита требует более глубокого изучения их совместной работы, особенно в упругопластической и пластической областях деформирования.

Целью настоящей работы явилось изучение на натуральных фрагментах труб и образцах особенностей совместной работы трубы с локальным дефектом и усиливающего КПБ, а также оценка эффективности использования КПБ для повышения прочности трубопровода при статическом и циклическом нагружении внутренним давлением.

Для исследований использовали фрагменты трубы Ду 720×10, изготовленной (ТУ 14-31573-96) из стали марки 13Г1С-У, и трубы Ду 530×8, изготовленной (ТУ 14-8-20-99) из стали марки 17Г1С-У. К трубам длиной 4 м приваривали полусферические днища. На внешней поверхности труб с помощью абразивного круга наносили искусственные дефекты, размеры которых приведены на рис. 1 и 2.

Коэффициенты снижения несущей способности трубы определяли, исходя из предпосылки, согласно которой влияние дефекта аналогично влиянию

одиночного сквозного отверстия при равенстве площадей дефекта и отверстия в продольном направлении [4–6]. Исходя из фактических размеров дефектов, коэффициенты снижения прочности составили: для трубы Ду 720×10 — 0,72, Ду 530×8 — 0,617.

Усиление дефектных участков осуществляли путем наложения многослойного бандажа. Технология нанесения КПБ предусматривает подготовку поверхности трубы с помощью пескоструйной обработки, а также заполнение дефектов и сглаживание неровностей, в частности, при наличии усиления в сварном шве, с помощью композитного материала РЭМ-Сталь, технические характеристики которого представлены в ТУ 2257-005-00396558-98. После полимеризации РЭМ-Стали и зачистки поверхности в соответствии с ВРД 39-1.10-013-2000 наносили КПБ. Для обеих труб бандаж состоял из семи слоев стеклосетки и его толщина составила примерно 4 мм. Ширина бандажа для трубы Ду 720 составляла 490 мм, а для трубы Ду 530 – 460 мм. Все операции по установке бандажей выполняли при избыточном давлении в трубах 4,94 МПа, что соответствует 70 % рабочего давления. После полной полимеризации бандажей приступили к испытанию труб.

Программа испытаний предусматривала определение фактических механических свойств металла труб Ду 720 и 530; измерение фактической толщины стенки в исследуемых фрагментах труб; исследование напряженно-деформированного состояния образцов-стендов в упругой стадии наг-

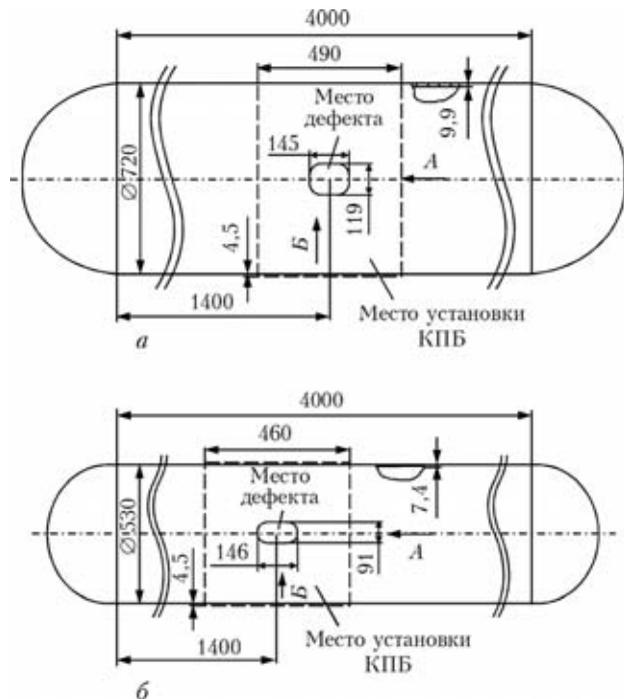


Рис. 1. Образцы-стенды Ду 720 (а) и 530 (б) с нанесенными дефектами и КПБ

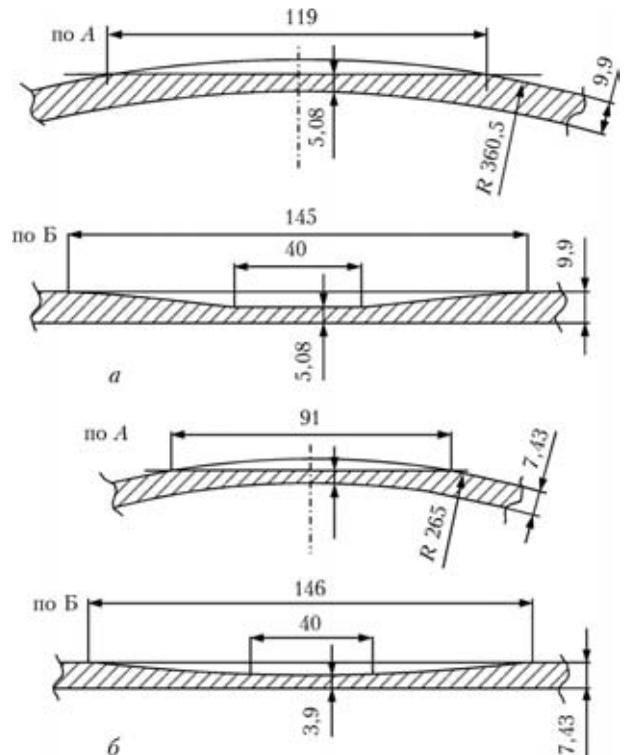


Рис. 2. Геометрические размеры дефектов на образцах-стендах: а — Ду 720; б — Ду 530

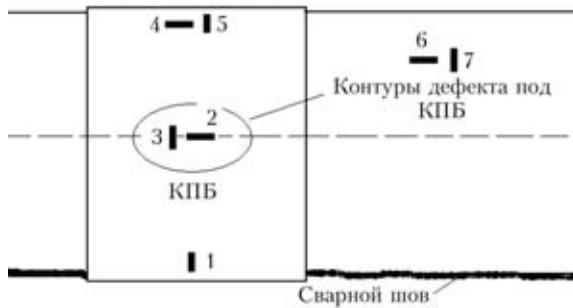


Рис. 3. Схема размещения датчиков (тензорезисторов) на образцах-стендах Ду 720 и Ду 530

ружения; испытание образца-стенда Ду 530 при циклическом нагружении; испытание образцов-стендов внутренним давлением до разрушения; исследование совместной работы стенки трубы с РЭМ-Сталью; испытание обечайки с КРБ на сплющивание.

Механические свойства металла труб определяли на стандартных образцах, вырезанных из обечайек свидетелей, отрезанных от трубы, и на образцах, изготовленных из трубы после ее разрушения. Результаты испытаний удовлетворяют требованиям технических условий как на трубу Ду 720, так и на трубу Ду 530.

Измерение толщины стенки проводили ультразвуковым толщиномером ТУЗ-2 с целью установления фактического его значения и области рассеяния на трубе длиной 4 м. Для образца-стенда Ду 720 результаты измерений находились в диапазоне 9,77...10,0 мм при среднем значении толщины стенки 9,9 мм. Для Ду 530 диапазон измерений толщины стенки составил 7,36...7,53 мм при среднем значении 7,43 мм.

Напряженно-деформированное состояние образцов-стендов исследовали с целью установления совместной работы трубы и бандажа на всех этапах нагружения, соответствующих работе трубопровода. Для измерения относительных деформаций использовали проволочные тензорезисторы типа 5П1-20-200-Б12 с базой 20 мм и измеритель статических деформаций ИСД-3. Деформации на стенке трубы и бандажах в местах дефектов и на удалении от них измеряли в продольном и кольцевом направлениях. Схема размещения датчиков приведена на рис. 3.

Следует заметить, что на трубу датчики наклеивали при отсутствии внутреннего давления, а на бандаж при давлении, составляющем 70 % рабочего. Деформации измеряли при поэтапном снижении давления до нуля и последующем увеличении внутреннего давления до 9,81 МПа. Результаты измерения деформаций в кольцевом и продольном направлениях приведены на рис. 4.

Как видно, нулевые деформации в бандаже соответствуют давлению в трубе 4,94 МПа. Нулевые деформации в трубе имеют место при отсутствии внутреннего давления. При этом в бандаже наблюдаются деформации сжатия.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что деформирование бандажа происходит совместно с трубой как при снижении, так и при подъеме давления. Градиент деформаций в зоне дефекта (датчики 2 и 3) и в зоне продольного сварного шва (датчик 1) более высокий. На образце-стенде Ду 530 это проявляется в меньшей степени. Кольцевые и продольные деформации в теле трубы и на бандаже вне зоны дефекта и сварного шва

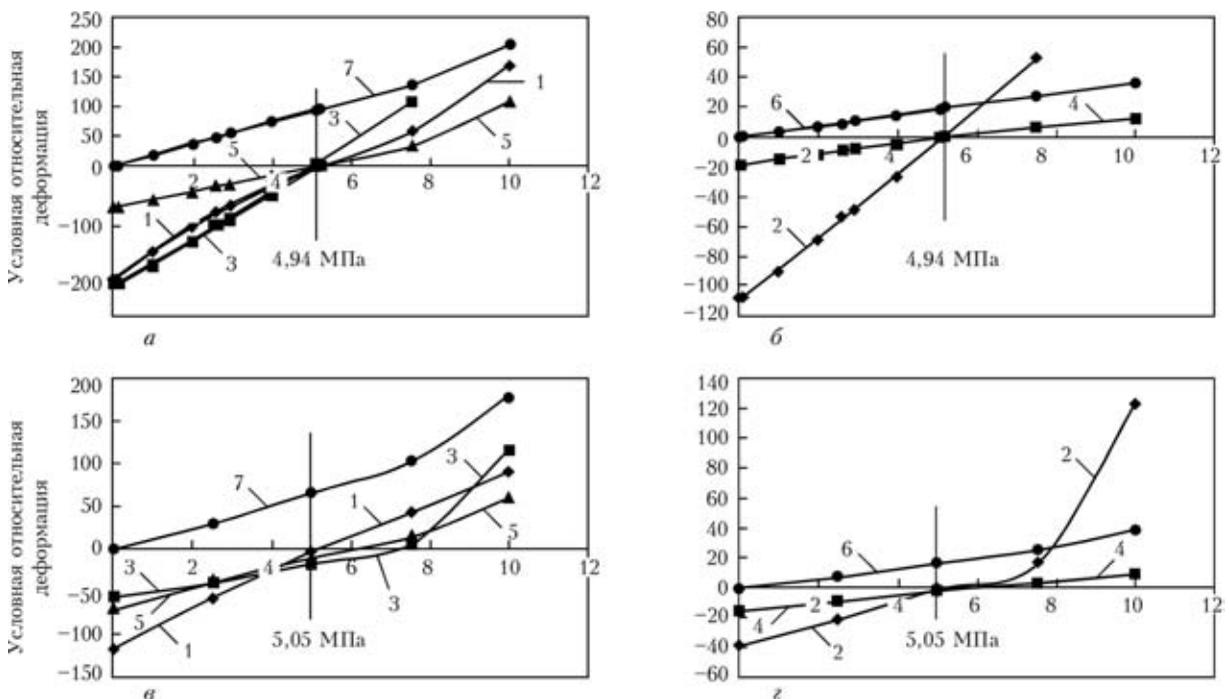


Рис. 4. Результаты измерения кольцевых (а, в) и осевых (б, з) деформаций образца-стенда Ду 720 (а, б) и Ду 530 (в, з) (1-7 номера датчиков тензорезисторов)

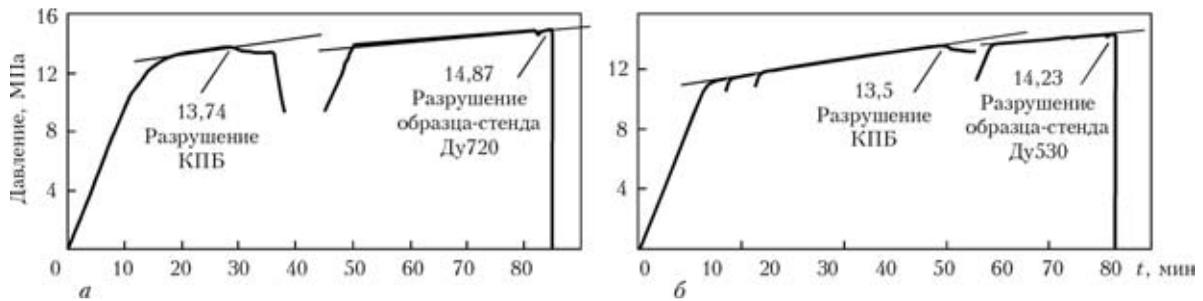


Рис. 5. Диаграммы гидравлических испытаний образцов-стендов Ду 720 (а) и Ду 530 (б) внутренним давлением до разрушения

(датчики 5 и 7) практически одинаковы. При давлении 9,81 МПа наблюдается отклонение деформаций от линейного закона, что связано с достижением в трубе напряжений текучести.

Бандаж начинает принимать на себя часть усилий после поднятия давления выше того, при котором он устанавливался.

Важным элементом проверки совместной работы трубы и бандажа явились испытания на циклическую нагрузку образца-стенда Ду 530. Нагрузку осуществлялось избыточным внутренним гидравлическим давлением 0,4...7,5 МПа. Период цикла напряжений составил около 36 с. За базу испытаний приняли долговечность 10^4 циклов, что соответствует 33 годам эксплуатации трубопровода. Нагрузку создавали гидроагрегатом ПТР 1-1-400 производительностью 1000 л/ч. Управление процессом нагружения выполняли в автоматическом режиме. Параметры нагружения контролировали высокоточным манометром и датчиком давления «Метран 100-ДИ». Максимальные напряжения цикла составили около

$0,6\sigma_T$, т. е. испытания проводили в упругой области. После 2500; 5000; 8000 циклов, а также после завершения испытаний (10036 циклов) проводили осмотры трубы и бандажа. Расслоений и трещин в бандаже, а также отслоений бандажа от тела трубы обнаружено не было.

Испытанию до разрушения были подвергнуты образцы-стенды Ду 720 и Ду 530. Образец-стенд Ду 530 предварительно прошел циклические испытания. Нагрузку поднимали поэтапно с 10-минутной выдержкой после каждого этапа и визуальным осмотром трубы и бандажа. Этапы нагружения предусматривали: рабочее давление; полуторное рабочее давление; давление, соответствующее пределу текучести в материале; давление разрушения образца-стенда. Ход испытаний потребовал дополнительных остановок в пластической области работы трубы, что связано с разрушением бандажа, которое наблюдалось до разрушения трубы. Полные диаграммы испытаний образцов-стендов представлены на рис. 5.

Разрушение трубы, усиленной КPB, имеет свои особенности. При нагрузках, вызывающих пластическое деформирование трубы, в месте дефекта начинает формироваться область концентрации деформаций. Когда деформации достигают критических значений для бандажа, происходит его разрыв, который охватывает не всю ширину бандажа, а только часть, расположенную над дефектом. При этом отслоения бандажа от трубы не наблюдается. В момент разрыва бандажа давление в трубе несколько падает, а затем снова начинает расти и превосходит уровень первоначального разрыва бандажа. На этом этапе несколько уменьшается угол наклона диаграммы нагружения, что свидетельствует о замедлении роста нагрузки и более интенсивном росте деформаций. Разрушение образца-стенда Ду 720 (рис. 6) вязкое, произошло при внутреннем давлении 14,87 МПа. При этом образовалась продольная трещина, которая прошла через середину дефекта. Непосредственно перед разрушением трубы происходило отслоение бандажа в зоне дефекта, сопровождаемое характерным потрескиванием.

Испытание образца-стенда Ду 530 проводили по той же схеме, что и Ду 720. При давлении 13,5 МПа произошел первый разрыв части бан-

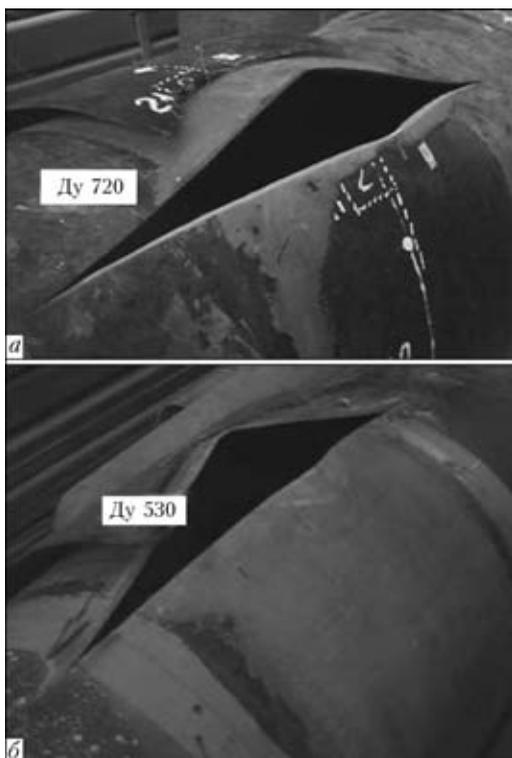


Рис. 6. Внешний вид разрушенных образцов-стендов



Результаты испытания до разрушения образцов-стендов Ду 720 и Ду 530

Ду трубы	Минимальная толщина стенки (фактическая), мм	Прочностные свойства стали				Напряжения в трубе при разрушении бандажа, МПа	Напряжения разрушения трубы, МПа	Коэффициент ослабления трубы с дефектом (φ)	Коэффициенты ослабления трубы, усиленной бандажом	
		по ТУ (min), МПа		экспериментальные, МПа					относительно фактических свойств	относительно нормативных требований
		σ_T	σ_B	σ_T	σ_B					
720×10	9,77	380	540	388,2	560,6	518,93	540,5	0,720	0,927/0,964	0,961/1,00
530×8	7,36	360	510	391,65*	560,65*	479,3	504,2	0,617	0,864/0,910	0,940/0,989

* Минимальные механические свойства, полученные на образцах, вырезанных из трубы, после ее испытания.

дажа (около 30 % его ширины). Разрушение трубы произошло при давлении 142,3 МПа (рис. 6, б).

Обобщение результатов испытаний образцов стендов Ду 720 и Ду 530 приведено в таблице.

Критерием оценки эффективности КРБ может служить сопоставление коэффициентов прочности трубы, усиленной бандажом, и коэффициентов ослабления трубы дефектом. Коэффициент прочности трубы, усиленной бандажом, рассматривается, исходя из частичного разрушения бандажа и полного разрушения трубы с бандажом.

Образец-стенд Ду 530 показал несколько меньшую эффективность бандажа. Возможно, на результат повлияло предварительное испытание его циклической нагрузкой, а также использование в качестве исходных механических свойств результатов, полученных на образцах, вырезанных из трубы после ее испытания до разрушения. Возможно также, что эффективность бандажа несколько снижается с увеличением ослабления трубы дефектом.

Как видно, эффективность использования бандажей существенная, даже если за предельное состояние рассматривать частичный разрыв бандажа. Вместе с тем ясно, что 100%-е восстановление прочности трубы потребует настолько значительного увеличения толщины бандажа, что экономически это будет неоправдано.

Коэффициенты ослабления трубы, приведенные в последнем столбце таблицы, получены исходя из минимальных значений временного сопротивления сталей, оговоренных ТУ на трубы. Этот показатель достаточно условен, поскольку нормативные значения механических свойств трубы ниже фактических.

Для получения представления о совместности деформирования металла трубы и РЭМ-Стали проводили испытания на растяжение образцов с нанесенным на них слоем РЭМ-Стали. Образцы вырезали из обечайки-свидетеля Ду 720. Испытывали три образца до разной степени пластического деформирования.

Нагрузку в первом образце доводили до образования в нем шейки. Напряжения при этом составили 568,8 МПа, что практически соответ-

ствует временному сопротивлению стали. Относительное удлинение в образце, измеренное после снятия нагрузки, составило 17 %. Растрескивание и отслаивание РЭМ-Стали было зафиксировано при напряжениях 505 МПа.

При испытании второго образца напряжения достигли 538,6 МПа, остаточные деформации 4,25 %. Начало отслоения и в этом образце было зафиксировано при напряжении примерно 505 МПа.

В третьем образце, когда напряжения достигли 468,8 МПа, нагружение было приостановлено. При этом остаточное удлинение составило 1,5 %. На этом образце следов отслоения или растрескивания РЭМ-Стали обнаружено не было.

Эти испытания подтвердили, что при упругих и упругопластических деформациях РЭМ-Сталь работает совместно с металлом трубы. Отслоение и растрескивание имеет место, когда пластические деформации составляют 2... 3 %.

Если эти результаты перенести на трубопровод, то можно видеть, что отслоение РЭМ-Стали происходит на самой заключительной стадии нагружения трубы, когда определяется место концентрации деформаций.

Совместность работы трубы и бандажа при деформировании была проверена испытанием обечайки с бандажом на сплющивание. Испытания ставили своей целью определение относительной деформации, при которой нарушается совместность работы металла и бандажа. Разрыв бандажа имел место при сплющивании обечайки Ду 530 с бандажом до расстояния между наружными стенками 220 мм. При снятии нагрузки это расстояние выросло до 265 мм. Относительная деформация металла, при которой произошло растрескивание бандажа, составила около 7,8 %. Этот результат еще раз подтверждает совместность работы бандажа и трубы при достаточно больших локальных пластических деформациях.

Вместе с тем испытания на растяжение образцов в виде полос шириной 44 мм, вырезанных после разрушения образца-стенда из участка бандажа, удаленного от места разрушения, показали, что материал бандажа работает упруго вплоть до разрушения. Относительное удлинение образцов

практически равно нулю. Однако при совместной работе с трубой разрушение бандажа происходит, как отмечено выше, при достаточно значительных пластических деформациях в трубе. Это объясняется тем, что модуль упругости композита более чем на два порядка ниже модуля упругости стали, бандаж наносится на нагруженную трубу и частично пластические деформации трубы бандаж способен воспринимать за счет пластичности наполнителя.

Выводы

1. Результаты испытаний фрагментов труб, усиленных в местах дефектов КПБ, показали, что деформации в бандажах пропорциональны деформациям трубы. Это свидетельствует о совместной работе трубы и бандажа не только в упругой области при растягивающих и сжимающих напряжениях в бандаже, но и в области упругопластических деформаций в трубе.

2. Испытания пульсирующим циклом с максимальными напряжениями цикла, соответствующими рабочему давлению в трубе, показали совместность работы трубы и бандажа на всей базе испытаний (10^4 циклов) и не привели к образованию усталостных трещин.

3. При данном сочетании геометрических размеров и механических свойств трубы, размерах дефекта и условиях установки бандажа, разруше-

ние последнего предшествует исчерпанию несущей способности трубой. Разрыв бандажа происходит в месте дефекта на этапе концентрации пластических деформаций в этой зоне, носит локальный характер и не сопровождается отслоением бандажа от трубы.

4. Результаты испытаний образцов-стендов Ду 720 и Ду 530 показали, что разрушение бандажа происходит при напряжениях, которые составляют 86,4...92,7 %, а разрушение труб — 91...96,4 % значений временного сопротивления металла трубы. Это свидетельствует о том, что бандаж существенно повышает прочность трубы с дефектом.

1. *Ремонт магістральних трубопроводів під тиском* / М. В. Беккер, В. С. Бут, Р. М. Говдяк та ін. — К.: Кий, 2008. — 232 с.
2. *Alexander C., Francini B.* State of the art assessment of composite systems used to repair transmission pipe lines // 6th Intern. pipeline conf. 25–29 Sept., 2006. — Calgary, Alberta, Canada, IPC 2006-10484. — 8 p.
3. *ASME B 31.4, ASME B 31.8.* Classes of ASME Boiler and Pressure vessel Code. — Date 10.05.90.
4. *ПНАЭ Г-7-002-86.* Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоиздат, 1989. — 524 с.
5. *ОСТ 108.031.08-85.* Котлы стационарные и трубопроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность. — Введ. 01.07.87.
6. *Гарф Э. Ф., Непребский М. А.* Оценка прочности и ресурса трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями // Автомат. сварка. — 2000. — № 9/10. — С. 15–20.

The paper gives the results of testing 720×10 and 530×8 mm pipes with composite-polymer bands in the sections with defects simulating local corrosion damage, reinforced in the defect location. Joint work of the band and pipe at static and cyclic loading caused by inner pressure, is shown. Effectiveness of reinforcement of defective pipeline sections by composite-polymer bands and features of fracture of a banded pipe are demonstrated.

Поступила в редакцию 02.02.2011

AWST-2011

ДОСТИЖЕНИЯ В СВАРОЧНОЙ НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

24–25 октября 2011

Gloria Golf Resort — Белек/Анталия

GEV (Gedik Education Foundation) и ТКТА (Turkish Welding Technology Academy) приглашает экспертов по сварке и ученых со всего мира на Международный конгресс AWST-2011 IIW (Международный институт сварки).

Тематика конгресса (последние разработки в таких темах):

- новейшие стали и алюминиевые сплавы и их свариваемость
- разработка сварочных материалов, передовых способов сварки, СТП, лазерной сварки
- методы проектирования и моделирования и промышленного применения
- испытания и характеристики швов
- анализ механизмов усталости–разрушения–коррозии–ползучести металла швов
- методики оценки соответствия эксплуатации (FFS), применения и стандартизация
- образование и подготовка кадров для сварочного производства

По всем вопросам обращаться: Gedik Education Foundation,
e-mail: scientific@awst2011.com, тел: +90.216 378 7941, Website: www.awst2011.com