

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ И ДИАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*С. И. Кучук-Яценко, Л. М. Лобанов*

*Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев*

*Надійшла до редакції 09.02.06*

**Резюме:** Описаны эффективные технологии и оборудование для сварки труб в заводских условиях и при строительстве трубопроводов. Рассмотрены вопросы оценки работоспособности трубопроводов с зонами эрозионно-коррозионных повреждений, их прочности, влияния пластической деформации на вязкость разрушения трубных сталей и изменения свойств металла после длительной эксплуатации. Описаны новое поколение автоматизированных ультразвуковых установок для контроля качества сварных труб, системы ультразвукового контроля, не требующие применения контактной жидкости, и низкочастотные системы ультразвукового контроля в труднодоступных местах. Показаны возможности метода акустической эмиссии для диагностики и мониторинга технического состояния трубопроводов. Отмечены магнитный коэрцитиметрический способ и метод электронной широгрфии. Описаны технологии оперативного ремонта трубопроводов и присоединения к ним отводов под давлением с применением дуговой сварки и сварки под водой. Обсуждены задачи снижения тепловых потерь на газоперекачивающих станциях и повышения эффективности транспортирования газа.

**Ключевые слова:** магистральные нефте- и газопроводы, сварка, диагностика, неразрушающий контроль, ремонт.

### **С. І. Кучук-Яценко, Л. М. Лобанов. НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ТА ДІАГНОСТИКИ ТРАНСПОРТНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ.**

**Резюме:** Описані ефективні технології і обладнання для зварювання труб у заводських умовах і під час прокладання трубопроводів. Розглянуті питання оцінки працездатності трубопроводів із зонами ерозійно-корозійних пошкоджень, їх міцності, впливу пластичної деформації на в'язкість руйнування трубних сталей та зміни властивостей металу після довготривалої експлуатації. Описані нове покоління автоматизованих ультразвукових установок для контролю за якістю зварних труб, системи ультразвукового контролю, що не потребують застосування контактної рідини, та низькочастотні системи ультразвукового контролю у важкодоступних місцях. Показані можливості методу акустичної емісії для діагностики і моніторингу технічного стану трубопроводів. Відмічені магнітний коерцитиметричний спосіб та метод електронної широгрфії. Наведені технології оперативного ремонту трубопроводів і приєднання до них відводів під тиском із застосуванням дугового зварювання і зварювання під водою. Обговорені задачі зниження теплових втрат на станціях перекачування газу і підвищення ефективності транспортування газу.

**Ключові слова:** магістральні нафто- та газопроводи, зварювання, діагностика, неруйнівний контроль, ремонт.

**S. I. Kuchuk-Yatsenko, L. M. Lobanov. NEW TECHNOLOGIES OF WELDING AND DIAGNOSTICS OF TRANSPORT POWER SYSTEMS.**

**Abstract:** Effective technologies and equipment for welding pipes under the shop conditions and in the construction of pipelines are described. Problems of assessment of performance of pipelines, their strength with zones of erosion-corrosion damages, effect of plastic deformation of fracture toughness of pipe steels, changes in properties of metal after the long-term service are considered. New generation of automated ultrasonic units for the quality control of welded pipes, systems of ultrasonic testing, not requiring the application of a contact liquid, and low-frequency systems of the ultrasonic testing in hard-to-reach places has been described. Capabilities of the acoustic emission method for diagnostics and monitoring of the technical condition of pipelines are shown. Magnetic coercimetric method and method of electron shearography are described. Technology of in-process repair of pipelines and connection of branch pipes to them under the pressure using arc welding and underwater welding are presented. An attention is paid to the problems of reducing the heat losses at the gas pumping stations and improving the effectiveness of gas transportation.

**Keywords:** main oil and gas pipelines, welding, diagnostics, non-destructive testing, repair.

Состояние и перспективы развития энергетики Украины во многом определяются ее нефте- и газотранспортными системами. Следует отметить, что в Украине в исторически короткий срок были созданы уникальные по протяженности и производительности магистральные трубопроводы для транспортировки природного газа, нефти и продуктов их переработки.

Газотранспортная система Украины включая магистральные газопроводы и газопроводы ответвления имеет суммарную длину 35 000 км, а транспорт нефти осуществляется по магистральным трубопроводам длиной 4 600 км. Почти половина магистральных трубопроводов эксплуатируется уже более 25 лет. Значительная часть из них выработала свой расчетный ресурс. Поэтому весьма актуальными являются проблемы оценки технического состояния и остаточного ресурса нефте- и газотранспортных систем.

Институт электросварки (ИЭС) им. Е. О. Патона выполняет большой комплекс исследований и разработок в области сварки и диагностики магистральных нефте- и газопроводов.

Развитие высокопродуктивных систем трубопроводного транспорта и, в первую очередь, повышение давления транспортируемого продукта до 10 МПа и более в сочетании с обеспечением высокой надежности их экс-

плуатации обуславливает необходимость организации производства труб нового поколения с улучшенными служебными характеристиками. К таким трубам наряду с повышенной прочностью и толщиной стенки предъявляются существенно более жесткие требования к вязкости металла, его структурно-фазовому состоянию, ограничению содержания вредных примесей и загрязненности неметаллическими включениями. Возможность удовлетворения этих требований базируется, прежде всего, на повышении качества применяемого листового проката. Научные и технологические разработки и их внедрение при изготовлении трубных сталей на металлургических заводах Украины позволили в значительной мере решить данную задачу. На их базе Харцызский трубный завод с участием ИЭС и других организаций выпустил опытные партии и освоил производство труб с толщиной стенки до 25,8 мм, в т. ч. из стали класса прочности K65, что соответствует характеристикам стали X80. Эти трубы предназначены для мощных газопроводов, предназначенных для рабочего давления 10 МПа.

Производство труб с повышенными эксплуатационными характеристиками требует применения новых перспективных технологий сварки. С этой целью Институтом электросварки был разработан и освоен процесс пятидуговой сварки под флюсом, что позво-

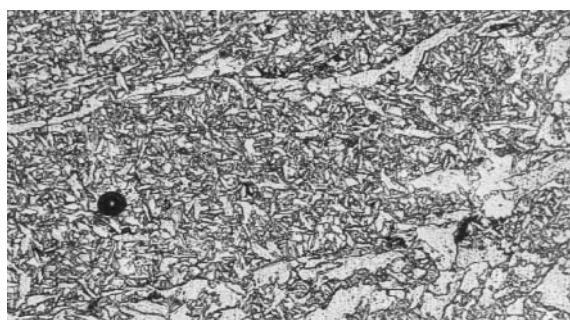


Рис. 1. Пятидуговая сварка под флюсом

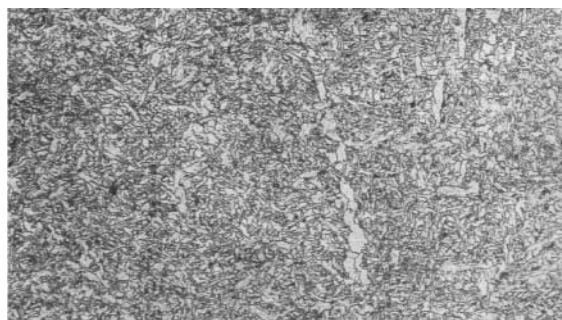
лило получать продольные швы труб с толщиной стенки до 50 мм за два прохода, обеспечивая хорошие показатели механических свойств и качества сварных соединений (рис. 1).

Возникшая при производстве труб нового поколения диспропорция показателей хладостойкости и трещиностойкости основного металла и сварных соединений устраняется за счет разработки и применения новых сварочных материалов. На рис. 2 показано формирование в металле шва благоприятной структуры игольчатого феррита при использовании алюминатно-основных флюсов для многодуговой сварки труб. Сочетание флюса указанного типа с проволокой, легированной титаном и бором, позволяет при оптимальном их содержании получить структуру игольчатого феррита с высоким углом разориентации и ударную вязкость металла более 100 Дж/см<sup>2</sup> при -20 °С.

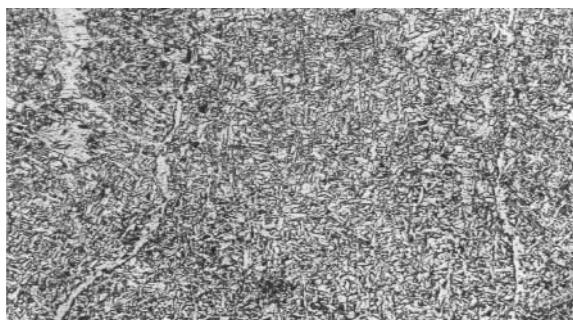
Ближайшей задачей в области технологии сварки труб для высокопроизводительных трубопроводов является организация про-



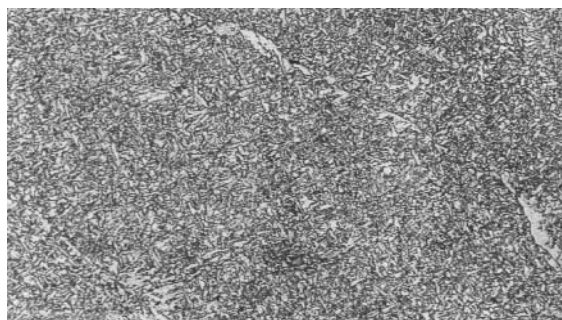
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 2. Структура металла швов при сварке трубной стали К60 (X70): *a* – кислый флюс; *б* – флюс нейтрального типа; *в* – флюс с основностью 1,3; *г* – флюс с основностью 1,5

мышленного производства новых сварочных материалов.

Одной из актуальных проблем при строительстве и ремонте трубопроводов для транспортирования нефти и газа является механизация сварки неповоротных стыков. В связи с нестабильностью геометрических размеров стыков труб и для обеспечения качества сварных швов требуется применение мощной и тяжелой техники, что не всегда возможно из-за ограниченности рабочего пространства. Это обуславливает необходимость создания малогабаритного мобильного оборудования, которое может доставляться на рабочее место вручную, и применения технологий сварки, которые обеспечивают качественное формирование швов при односторонней сварке без подкладок.

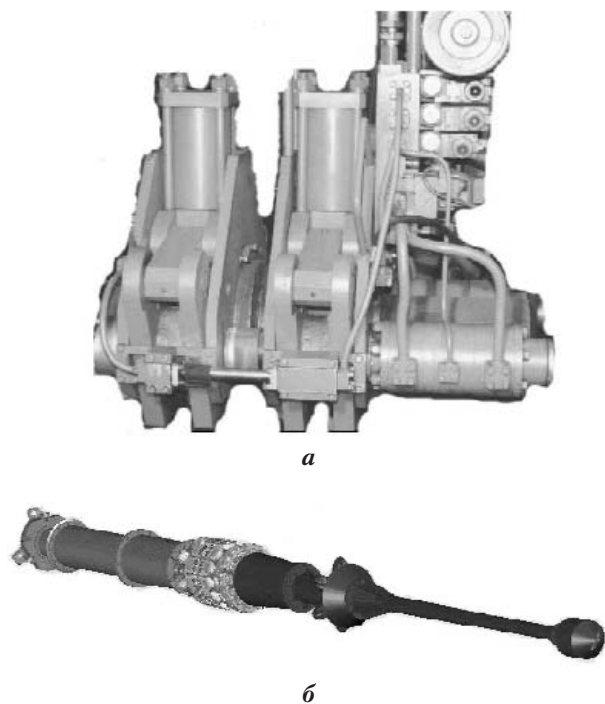


Рис. 3. Новое поколение оборудования для контактно-стыковой сварки трубопроводов: *а* – машина для сварки трубопроводов  $\varnothing$  114–219 мм (вес 2 т, мощность 100 кВА); *б* – внутритрубная машина К1006 для сварки труб  $\varnothing$  1420 мм с толщиной стенки 22 мм (вес 16 т, мощность 600 кВА)

В ИЭС разработана технология механизированной сварки неповоротных стыков трубопроводов, предусматривающая выполнение корневых швов аргонно-дуговой сваркой неплавящимся электродом с активирующим флюсом, что обеспечивает получение качественного корневого шва без подкладки. Толщина корневого шва изменяется от 2,5 до 5 мм. Заполняющие проходы выполняются плавящейся проволокой сплошного сечения в защитных газах либо порошковой проволокой с принудительным формированием шва. Разработаны опытные образцы соответствующего оборудования для реализации этих технологий и определены режимы технологических процессов. Контактная стыковая сварка широко применяется при сооружении трубопроводов различного назначения на территории стран СНГ. Всего этим способом было сварено более 70 000 км трубопроводов, в том числе в условиях Сибири и Крайнего Севера, где эта технология используется и в настоящее время.

Продолжаются работы по совершенствованию технологии и оборудования для контактно-стыковой сварки (рис. 3). Основные направления исследований:

- совершенствование технологии с целью снижения мощности источников питания и повышения производительности;
- разработка технологии сварки труб из высокопрочных сталей, в т. ч. X80, X100 с толщиной стенки до 30 мм;
- разработка нового поколения оборудования, отличающегося высокой маневренностью и механизацией вспомогательных операций;
- разработка систем автоматического ультразвукового контроля (УЗК) соединений, выполненных сваркой давлением.

Лазерная сварка имеет много преимуществ по сравнению с традиционными сварочными технологиями. В развитых странах

уже начаты исследовательские работы по применению этого процесса с целью сварки

продольных швов для изготовления труб и кольцевых швов при прокладке магистральных трубопроводов. Разработчики Института электросварки предлагают как лазерную, так и лазерно-дуговую (гибридную) сварку для решения этих задач. Одновременное применение лазерного излучения и дуговой сварки плавящимся электродом позволяет резко увеличить производительность процесса и уменьшить погонную энергию сварки, что приводит к снижению деформаций, повышению прочности и ударной вязкости соединений (рис. 4).

Снижение надежности систем магистральных трубопроводов в процессе их длительной эксплуатации может быть связано со старением материала, накоплением коррозионно-эрозионных, усталостных и других повреждений, развитием технологических и эксплуатационных дефектов.

Одной из важных причин преждевременного исчерпания несущей способности трубопроводов в условиях высоких показаний давления, температуры и скорости является износ внутренней поверхности труб под действием механических и электрохимических процессов. В результате проведенных исследований разработан принципиально новый подход к оценке прочности участков трубопроводов с такими повреждениями. Он основан на теоретических и экспериментальных зависимостях, характеризующих размеры глубины и длины зоны повреждения, при которых обеспечивается расчетная прочность трубопроводов. Построенные диаграммы дают возможность определить предельные размеры зоны коррозионных повреждений на внутренней поверхности трубы.

Применительно к задачам обеспечения надежности трубопроводных систем магистрального транспортирования нефти и газа проведены комплексные исследования свойств основного металла и сварных соединений после длительных сроков эксплуатации. Уста-

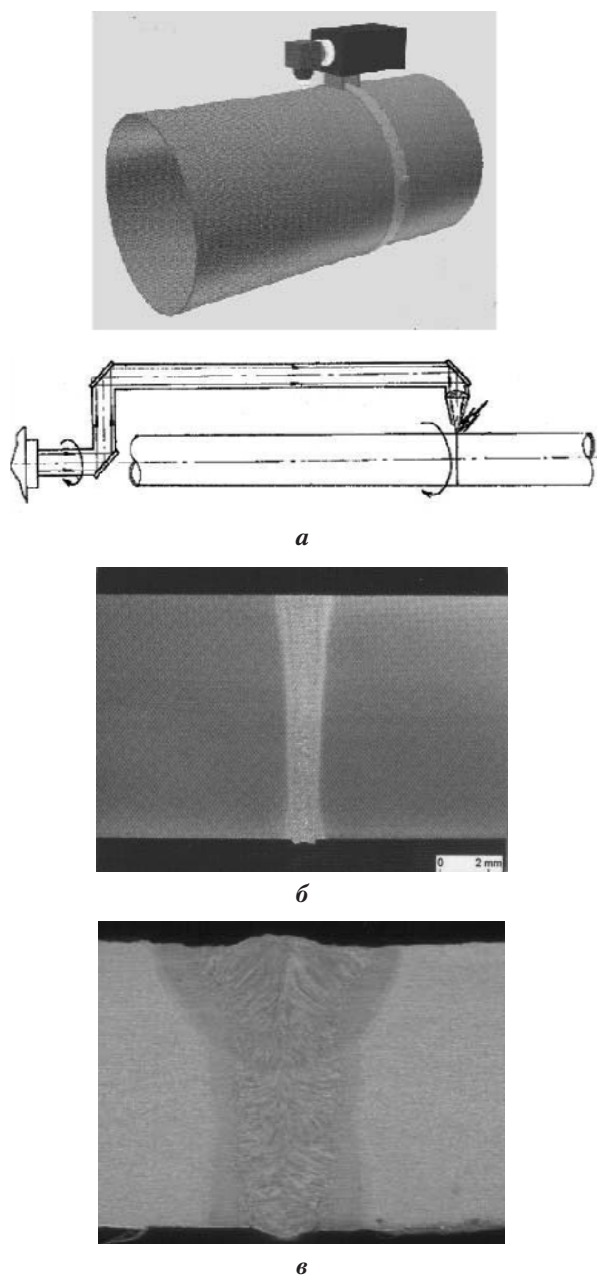


Рис. 4. Лазерная сварка кольцевых швов магистральных трубопроводов: *а* – схемы орбитальной сварки; *б* – макроструктура шва, полученного однопроводной лазерной сваркой; *в* – макроструктура шва, полученного четырехпроводной лазерно-дуговой сваркой

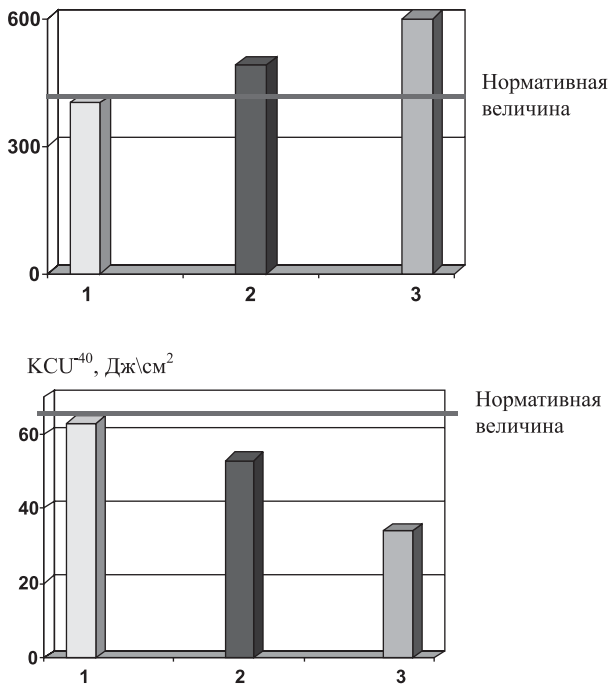


Рис. 5. Состояние металла трубопроводов: 1 – резервная труба; 2 – после эксплуатации в течение 40 лет; 3 – после искусственного старения

новлено, что для низколегированных трубных сталей длительная эксплуатация практически не приводит к изменению свойств материала. Вместе с тем деформационное старение трубных сталей может значительно ухудшить служебные характеристики металла трубопроводов и вязкости металла при его упрочнении (рис. 5). Однако, по данным проведенных исследований, при сроках эксплуатации

трубопровода примерно 40 лет негативных последствий деформационного старения следует ожидать, главным образом, на участках холодного деформирования труб в зонах расположения дефектов. Преобразование вследствие деформационного старения трубной стали в более прочный материал с пониженной пластичностью и вязкостью стимулирует разработку и применение труб с особыми техническими характеристиками на отдельных участках магистральных трубопроводов.

На изменение свойств металла существенно влияет пластическая деформация. Она может возникать в зонах конструктивных концентраторов напряжений (места варки тройников, отводов), различного рода дефектов, изменений геометрии трубы. Результаты исследования влияния на вязкость разрушения пластической деформации растяжения  $\epsilon_1$  и сжатия  $\epsilon_2$  металла труб представлены в таблице. Вязкость разрушения трубных сталей после пластического деформирования существенно уменьшается. Наиболее низкие значения вязкости разрушения были зафиксированы на образцах, имитирующих точечные механические повреждения металла труб – вмятины с неглубокими поверхностными надрывами.

Поддержание трубопроводных систем в работоспособном состоянии наиболее эффективно осуществляется определением текущего технического состояния ее элементов средствами технической диагностики с последующей заменой компонентов, которые не

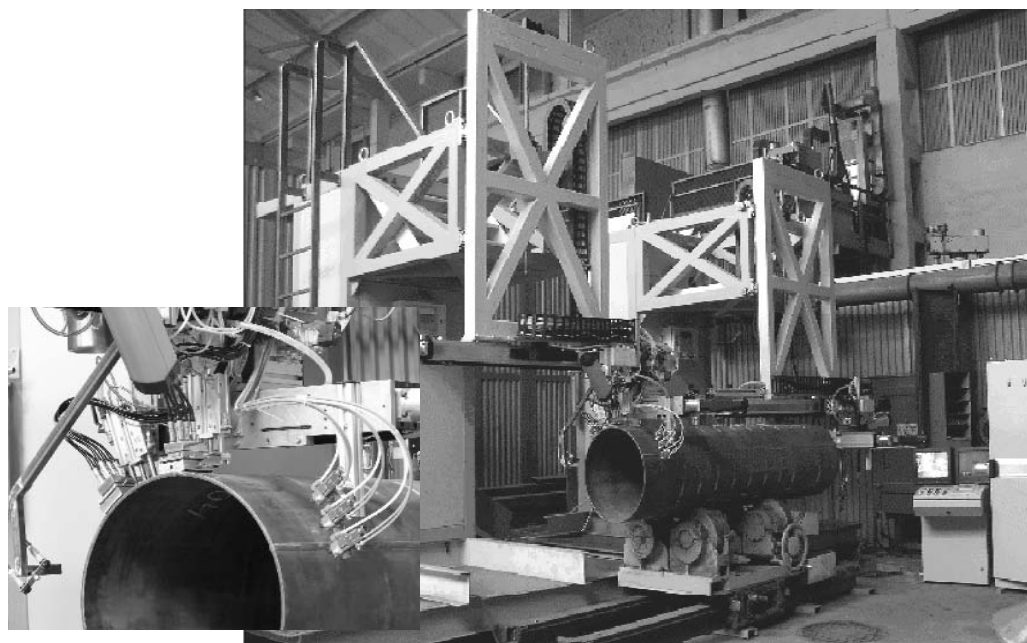
Таблица. Влияние локальных пластических деформаций

Марка стали	$\delta_k$ , мм	$\epsilon_1$ , %				$\epsilon_2$ , %		
		0	5	10	15	0	10	20
17Г1С	$\delta_i$	0,13	0,11	0,09	0,08	0,20	0,11	0,04
	$\delta_m$	0,38	0,23	0,11	0,09	0,25	0,21	0,08
	$\delta_i$	0,24	0,15	0,10	0,09	0,23	0,21	0,09
	$\delta_m$	0,34	0,21	0,17	0,17	0,31	0,25	0,12

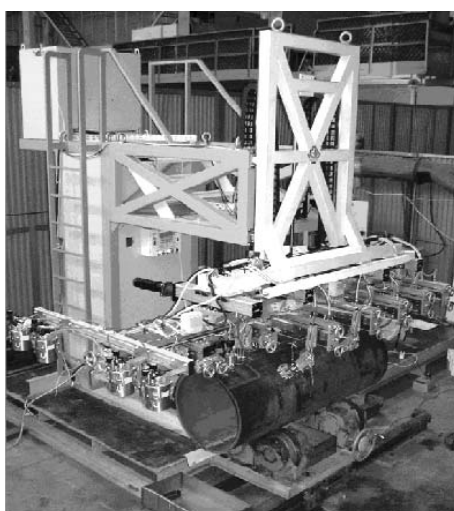
Примечание:  $\delta_i$  – на стадии иницирования вязкой трещины,  $\delta_m$  – на стадии перехода трещины в нестабильное состояние

отвечают заданному уровню надежности. С этой целью Институтом электросварки совместно с Институтом проблем прочности и рядом организаций нефтегазового комплекса

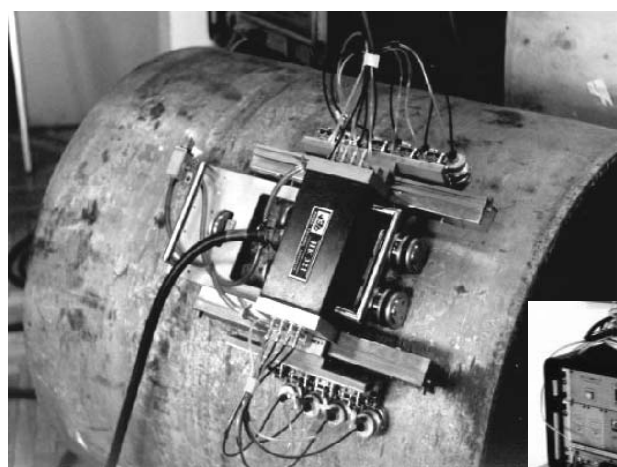
на основе использования новых информационных технологий была разработана типовая методика комплексного обследования и диагностирования линейной части магистраль-



*a*



*б*



*в*



**Рис. 6.** Новое поколение автоматизированных установок для ультразвукового контроля качества сварных труб: *a* – установка НК362 для контроля качества торцов труб; *б* – установка НК360 для контроля качества продольного сварного шва труб  $\varnothing$  508–1420 мм с толщиной стенки 7–50 мм; *в* – установка НК321 для контроля качества кольцевых сварных швов труб

ных трубопроводов. Основными элементами этой методики являются:

- подготовка, анализ исходных данных и формирование банка данных;
- обследование трубопровода с привлечением современных методов диагностики;
- оценка прочности и остаточного ресурса трубопровода;
- ранжирование дефектных участков по степени их опасности и разработка рекомендаций по методам и очередности выполнения ремонтных работ.

С учетом длительного срока эксплуатации основных систем магистральных газо- и нефтепроводов объемы диагностики и оценки их технического состояния, в т. ч. с привлечением разработанных методических подходов, должны быть, на наш взгляд, существенно увеличены.

В ИЭС была создана электрохимическая микропроцессорная система коррозионного мониторинга магистральных трубопроводов, которая позволяет определять электрохимический потенциал трубопровода, места повреждения защитного покрытия и скорость коррозии металла трубы в зоне дефектов защитного покрытия. Такая система применялась при обследовании магистральных газопроводов "Уренгой–Помары–Ужгород", "Прогресс", "Союз" и газопровода-отвода "Иванков–Зеленый Мыс–Чернобыль" диаметром 325 мм и протяженностью 75 км.

Использование коррозионного мониторинга с помощью электрохимической микропроцессорной системы на опасных участках газопроводов позволяет оценивать техническое состояние металла трубы под защитным покрытием и прогнозировать остаточный ресурс трубопроводов.

Повышение надежности и долговечности трубопроводов тесно связано с усовершенствованием методов и средств неразрушающего контроля качества.

Создано новое поколение автоматизированных ультразвуковых установок для контроля различных типов сварных труб нефтяного и газового сортаментов. В качестве примера на рис. 6, а представлена установка для автоматизированного ультразвукового контроля концевых участков труб диаметром до 1 420 мм с толщиной стенки 7–50 мм. Установка предназначена для прозвучивания по периметру концов труб по всей толщине стенки и позволяет выявлять дефекты типа расслоения и продольно ориентированные дефекты типа трещин.

Построена установка для автоматизированного ультразвукового контроля продольных сварных швов труб с такими же диаметрами и толщинами стенки (рис. 6, б). Она предназначена для прозвучивания сварного шва по всей толщине стенки трубы с обеих сторон шва и позволяет выявлять различно ориентированные дефекты типа трещин, пор, шлаковых включений, непроваров в условиях массового производства труб. Установка снабжена системой лазерного слежения за валиком усиления сварного шва в комплексе с промышленным компьютером.

Также была создана установка для автоматизированного ультразвукового контроля кольцевых сварных соединений трубопроводов (рис. 6, в). Она предназначена для обнаружения в шве и околошовной зоне дефектов типа пор, шлаковых включений, непроваров, трещин и позволяет определить их относительные размеры и места расположения с одновременной выдачей документа контроля в виде протокола.

Все разработанные автоматизированные системы ультразвукового контроля успешно используются в промышленности.

В Институте выполняется комплекс работ по совершенствованию систем ультразвукового неразрушающего контроля магистральных трубопроводов в полевых условиях. Одной из проблем достоверности ультра-



звукового контролю является обеспечение акустического контакта ультразвуковых преобразователей с контролируемой поверхностью. Прерывающийся или потерянный акустический сигнал сводит на нет результаты контроля.

Разработан электромагнитоакустический метод ультразвукового контроля, в котором

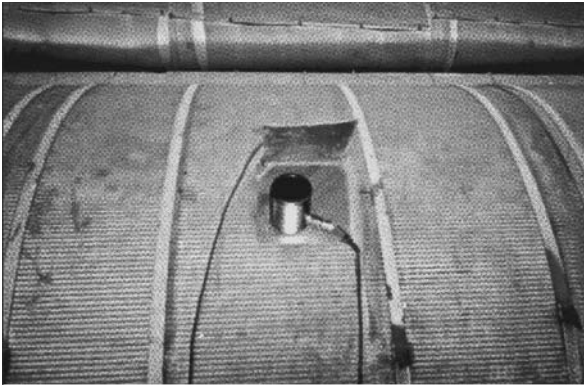


Рис. 7. Акустоэмиссионный контроль трубопроводов

возбуждение ультразвуковых волн в металле осуществляется с помощью преобразователя, не требующего контактной жидкости. Метод не критичен к качеству поверхности трубы и форме валика усиления шва. Он позволяет осуществлять контроль и при наличии на поверхности трубы изоляции толщиной до нескольких миллиметров. Электромагнитоакустический дефектоскоп успешно прошел промышленные испытания. Сканирование преобразователя по поверхности трубы и ввод ультразвуковых волн в разных направлениях обеспечивает идентификацию типа и размера дефектов в сварных соединениях и в материале трубы.

Наряду с открытыми имеется много протяженных закрытых трубопроводов, изучение коррозионных поражений которых затруднено из-за недоступности к участкам контроля. Это – подземные трубопроводы, проходящие под автомобильными и железнодорожными магистралями, галереи трубных переходов и т. п. Для установления повреждения в этих случаях разработаны технология и средства волноводного низкочастотного ультразвукового контроля протяженных объектов во время их эксплуатации. В отличие от обычного УЗК, использующего излучение высокой частоты, измеряемой в МГц, новый метод основан на использовании низкочастотного излучения в диапазоне 20–200 кГц, что позволяет обнаруживать коррозионные повреждения металла, отстоящие на расстоянии более 50 м от участка, на котором расположены ультразвуковые преобразователи. Созданы опытные образцы таких приборов, которые подтвердили эффективность низкочастотной системы ультразвукового контроля в труднодоступных местах.

Большие возможности для диагностики представляет метод акустической эмиссии. Разработаны специализированные методики и оборудование на основе использования эффекта акустической эмиссии. Портативная

аппаратура позволяет осуществлять надежный контроль технического состояния трубопроводов, сосудов под давлением и других конструкций (рис. 7). В институте были проведены широкие исследования, связанные с процессом распознавания и анализа сигналов, возникающих при деформировании и разрушении конструкционных материалов. Поскольку разрушение происходит дискретно, то каждый его этап сопровождается излучением также дискретного характера.

Импульсы излучения несут информацию о характере и опасности процесса. При этом осуществляется локация ослабленных зон на ранних стадиях разрушения. Сопоставление сигналов акустической эмиссии с реальными дефектами подтверждает высокую достоверность получаемой информации. Акустоэмиссионным методом уже проведено диагностирование около тысячи различных объектов. Его преимуществом является возможность осуществления 100 %-го контроля протяженных конструкций сравнительно небольшим количеством датчиков и определения опасных ситуаций на ранних стадиях их появления.

Это преимущество акустоэмиссионного метода позволило создать системы непрерывного мониторинга технического состояния объектов, к которым предъявляются повышенные требования к безопасности их эксплуатации. Так, разработанные технология и оборудование применены для непрерывного мониторинга трубы аммиакопровода, проходящего по мосту через р. Днепр в районе города Днепропетровска. Контролируется 1 км трубы датчиками, расположенными на левом и правом берегах реки по обе стороны пролета.

Система акустоэмиссионной диагностики установлена на Одесском Припортовом заводе и призвана в течение 15 лет обеспечивать непрерывный контроль состояния изо-термического хранилища аммиака, поверхность которого составляет 3 500 м<sup>2</sup>. В нижней

его части представлены аппаратура контроля, расположенная в непосредственной близости от корпуса хранилища, а также пульт контроля и управления эксплуатацией, расположенный в диспетчерской завода. Информация о состоянии хранилища аммиака передается также и на Киевский монитор по Интернету. Поэтому в Киеве можно в любой момент наблюдать и анализировать все процессы, протекающие в хранилище.

Следует отметить, что весьма перспективно также применение магнитных методов для диагностики сварных соединений в процессе эксплуатации трубопроводов. Уже получены сведения о чувствительности магнитных характеристик к накоплению усталостных повреждений в конструкционных материалах. На рис. 8 показано изменение величины коэрцитивной силы трубной стали при циклических испытаниях образцов на растяжение. Наблюдаются пороговые значения коэрцитивной силы, характеризующей несущую способность металла. Необходимы целенаправленные исследования в этой области, что позволит создать эффективный метод оценки ресурса сварных конструкций.

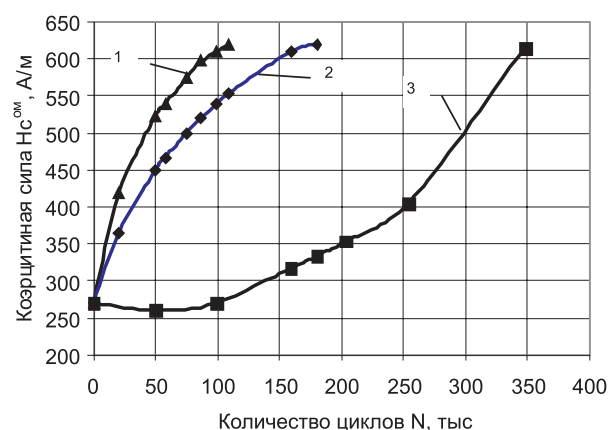


Рис. 8. Зависимость величины коэрцитивной силы стали 10Г2С1 от количества циклов и амплитуды напряжений при циклической нагрузке: 1 –  $\sigma_a = 39$  кг/мм<sup>2</sup>; 2 –  $\sigma_a = 34$ ; 3 –  $\sigma_a = 29$

В ИЭС разработаны методы лазерной интерферометрии для определения напряженно-деформированных состояний и контроля качества сварных соединений и конструкций. Широкие возможности в этом направлении представляет метод ширографии, основанный на электронной обработке оптической информации. Важным преимуществом этого метода является бесконтактность измерений и возможность наблюдения в реальном масштабе времени картин интерференционных полос, характеризующих производные от микроперемещений поверхности

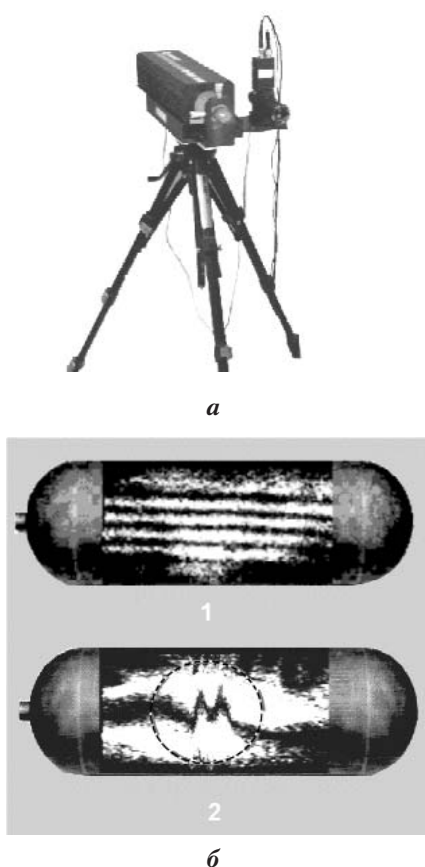


Рис. 9. Неразрушающий контроль качества сварных баллонов методом электронной ширографии: *а* – компактное оборудование для контроля качества методом электронной ширографии; *б* – картины интерференционных полос (1 – баллон без дефектов; 2 – баллон с трещиной в продольном сварном шве)

под действием заданной нагрузки. Как показано на рис. 9, методом электронной ширографии эффективно осуществляется неразрушающий контроль качества сварных баллонов для сжатого газа, используемого в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания на автотранспорте.

Следует отметить, что в Институте электросварки проведен большой комплекс научных исследований по созданию легких металлопластиковых баллонов для транспортировки сжатого до 20 МПа природного газа метана, используемого в качестве топлива. Обоснована возможность замены дефицитных трубных заготовок на сварной вариант металлического корпуса, который изготавливается из высокопрочной листовой стали. При этом вальцованная прямошовная обечайка соединяется кольцевыми швами со штампованными полусферическими доньшками. Наиболее нагруженная цилиндрическая часть корпуса баллона упрочняется дополнительной обработкой продольного шва и композиционной оболочкой из стекловолна или других волокон высокой прочности. Это позволяет получить комбинированные баллоны с массогабаритным показателем 0,6 кг/л. По долговечности (более 24 000 циклов нагружения) и по запасу прочности (более 3-х) они не уступают лучшим мировым образцам.

Были разработаны эффективные технологии ремонта трубопроводов и присоединения к ним отводов под давлением с применением дуговой сварки, которые позволяют сократить потери энергоресурсов, обеспечить бесперебойную работу трубопроводного транспорта и предохранить окружающую среду от экологического загрязнения при высоком уровне безопасности сварочных работ и надежности сварных соединений. Разработанные технологии охватывают широкий спектр методов ремонта дефектных участков линейной части трубопроводов в условиях эксплуатации и дают возможность:

- восстанавливать несущую способность трубопроводов с коррозионно-механическими повреждениями;
- усиливать дефектные сварные стыки;
- заглавливать коррозионные язвы и раковины;
- герметизировать сквозные дефекты в стенке трубы;
- присоединять отводы при подключении потребителей к основной магистрали.

Для каждого технологического процесса установлены безопасные условия выполнения сварочных работ, а также условия обеспечения качества и надежности сварных соединений при рабочих нагрузках. Установлены зависимости безопасных давлений в трубопроводах от толщины стенки трубы в месте сварки, величины сварочного тока и скорости транспортирования нефти и газа. Предложены новые конструктивно-технологические схемы усиления коррозионно-поврежденных участков герметичной муфтой и дефектных сварных стыков трубопроводов двухслойной муфтой. Механические свойства сварных соединений после такого усиления соответствуют нормативным требованиям. Доказано, что переход от соединений с угловым швом к нахлесточно-стыковым повышает долговечность и предел выносливости сварных соединений при циклическом и повторно-статическом нагружении.

С применением представленных технологий на объектах компании "Укртрансгаз" отремонтировано около 100 дефектных кольцевых стыков, выполнены десятки врезок отводов в действующие газопроводы под давлением и восстановлена работоспособность большого количества участков с поверхностными коррозионными повреждениями и коррозионными язвами (рис. 10).

Сложная проблема оперативного ремонта действующих трубопроводов является особенно острой для переходов через водные

преграды. Для решения этой проблемы в ИЭС создана технология ремонта магистральных трубопроводов на подводных участ-



*а*



*б*



*в*

Рис. 10. Внедрение ремонтных технологий на объектах "Укртрансгаз": *а* – двухслойная муфта; *б* – врезка отвода в газопровод под давлением; *в* – компаундная муфта

ках, которая основана на применении дуговой сварки непосредственно в воде. Технология гарантирует безопасность выполнения работ на действующем трубопроводе и обеспечивает достаточное качество соединений в местах восстановления.

Создано специализированное оборудование и ряд электродных материалов, предназначенных для сварки труб из малоуглеродистых и низколегированных сталей с пределом текучести до 490 МПа. Сварка выполняется на глубинах до 20 м. Ремонт поверхностных повреждений осуществляется без вырезки дефектных мест при внутреннем давлении в трубопроводе до 2,5 МПа. С использованием созданной технологии подводной сварки было отремонтировано более 70 нефте- и газопроводов с диаметром до 1 020 мм.

В заключение следует отметить, что большую актуальность приобретают проблемы снижения любых видов потерь и повышения эффективности работы транспортных энергетических систем. Так, например, газотрубные установки мощностью 16 МВт, используемые на газоперекачиваемых станциях для привода нагнетателей природного га-

за, выбрасывают в атмосферу тепловую энергию, эквивалентную 60–70 % потребляемой энергии. КПД таких установок не превышает 32 %. Эту энергию целесообразно использовать для дополнительного производства электроэнергии для собственных потребностей и потребностей предприятий или жилых массивов, расположенных около компрессорных станций. По оценкам "Укртрансгаза", суммарная дополнительная электрическая мощность, которая может быть получена от утилизации тепловой энергии, выделяемой газокomppressorными агрегатами Украины, составляет 1,5 млн кВт. Другой эффективный путь – это выработка на компрессорных станциях холода с помощью установок, утилизирующих тепло газотурбинных двигателей. Использование таких установок для охлаждения транспортируемого газа позволит примерно на 8–10 % повысить производительность магистральных трубопроводов.

Утилизация тепловых вторичных ресурсов на газокomppressorных станциях необходима также для соблюдения экологических требований, предъявляемых к крупным энергетическим объектам по Киотскому протоколу.