



УДК 621.791:621.643.1/2

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ ТРУБ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

С. Е. СЕМЕНОВ, А. А. РЫБАКОВ, кандидаты техн. наук, Л. В. ГОНЧАРЕНКО, Т. Н. ФИЛИПЧУК, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
М. Н. ДРОГОМИРЕЦКИЙ, Б. И. ПЕДЬКО, инженеры (ГК «Укртрансгаз», г. Киев)

Исследованы служебные свойства образцов труб, вырезанных из действующих газопроводов, а также из труб аварийного запаса. Показана возможность сохранения работоспособности трубного металла после длительных сроков эксплуатации. Установлено, что пониженные показатели прочности металла отдельных труб по сравнению с нормативными значениями не связаны с влиянием эксплуатационных нагрузок. Для обеспечения надежной эксплуатации старых газопроводов необходимо выявлять и устранять опасные дефекты металла, а также проводить диагностические обследования с идентификацией уложенных труб, оценкой уровня технических характеристик и стабильности качества.

Ключевые слова: газопровод, материал, эксплуатация, исследование, служебные свойства, состояние, старение

В ряде работ, посвященных оценке состояния действующих газо- и нефтепроводов, высказывается мнение об отрицательном влиянии длительности эксплуатации на работоспособность материала магистральных трубопроводов.

В результате проведенных нами ранее исследований материала длительно эксплуатируемых (до 35 лет) нефтепроводов [1, 2] не выявлено значительных изменений основных служебных свойств металла труб, что позволило сделать вывод о возможности сохранения работоспособности металла трубопроводов в процессе их длительного силового нагружения. При этом не исключается возможность появления локальных изменений трещиностойкости металла трубопровода, связанных с развитием деформационного старения [3, 4].

В отличие от нефтепроводов в газопроводах возможно развитие протяженных разрушений. Последствия процессов старения материала могут представлять значительную опасность для работы газопроводов. Поэтому большое значение имеет сохранение в металле длительно эксплуатируемых газопроводов прочностных и особенно вязкостных свойств.

Накопление данных о свойствах металла одновременно работающих газопроводов позволит с большей достоверностью судить о влиянии фактора длительного нагружения на материал трубопровода.

В связи с этим было исследовано состояние металла образцов труб, вырезанных из действующих газопроводов, а также из соответствующих труб аварийного запаса.

До 1970-х гг. при сооружении магистральных газопроводов использовали трубы из нормализованных и горячекатаных сталей. Трубы из современных сталей контролируемой прокатки начали применять позже. Срок работы таких газопроводов, как правило, не превышает 20 лет.

В настоящей работе исследовали образцы труб, соответствующие представителю ряду материалов газопроводов с достаточной длительностью (более 25 лет) периодом эксплуатации. Изучение пове-

дения труб из стали контролируемой прокатки при длительной эксплуатации с учетом специфических особенностей структуры и химического состава представляет самостоятельный интерес.

Бесшовные горячедеформированные трубы диаметром 508 мм (сталь типа 19Г) поставлялись в 1950–1970-х гг. из бывшей ЧССР. В отличие от сварных они имеют повышенную разностенность.

Горячеправленные трубы диаметром 529 мм производства Ждановского металлургического завода им. Ильича впервые стали изготавливать для систем магистральных трубопроводов нефти и газа в бывшем СССР из листовой кремнемарганцевой стали 10Г2СД (впоследствии 10Г2С1) с пониженным (до 0,12 %) содержанием углерода. Существенным недостатком технологического процесса их производства являлось применение односторонней сварки продольного шва, хотя механические характеристики основного металла и сварного соединения существенно улучшались благодаря горячей правке труб при нагреве до температуры нормализации стали.

Прямошовные трубы диаметрами 720 (сталь 17ГС) и 1220 мм (17Г1С) производства Челябинского трубопрокатного завода, а также трубы диаметром 1020 мм (сталь 17Г1С) производства Новомосковского трубного завода (НТЗ) являлись наиболее распространенной продукцией, поставляемой для сооружения нефте- и газопроводов. В отличие от труб диаметром 530...820 мм, изготавливаемых из горячекатаной стали, трубы диаметрами 1020 и 1220 мм выполняли только из нормализованных листов.

Трубы, производимые в ФРГ из нормализованной листовой стали типа 17Г1СФ, начали использоваться для строительства газопроводов диаметром 1420 мм самыми первыми.

До 1975 г. (до введения СНиП II-45–75) трубы изготавливали без учета ряда современных требований к их качеству. В частности, металл труб не контролировали по критериям, служащим для оценки сопротивления протяженным разрушениям. Не производили и обязательный в современных условиях производства 100%-й ультразвуковой

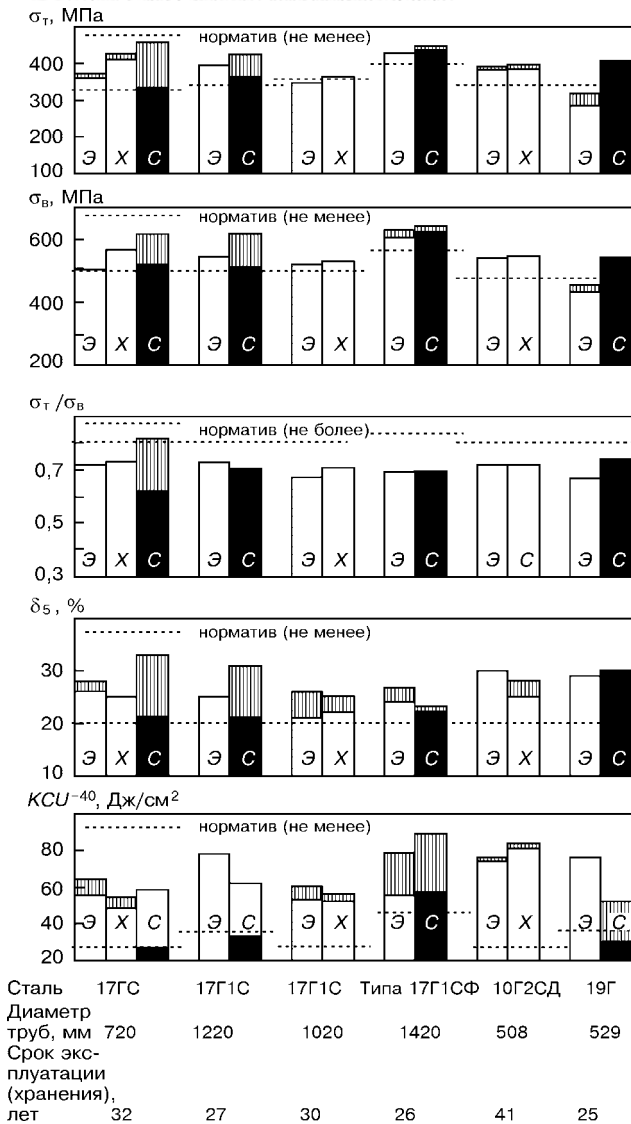


Рис. 1. Механические свойства основного металла исследованных труб: Э – трубы после эксплуатации; Х – трубы аварийного запаса; С – сертификатные данные; заштрихованная зона – область разброса значений

контроль листового проката и сварных соединений труб. После введения требований, касающихся ударной вязкости на образцах с V-образным надрезом и доли вязкой составляющей в изломе образцов типа DWTT, полностью отказались от производства упомянутых труб.

Методологические подходы к определению состояния материала действующих магистральных газопроводов рассмотрены в работе [1].

Материал труб после длительной эксплуатации и труб аварийного запаса исследовали в соответствии с требованиями технических условий, по которым они были изготовлены, а также с современными требованиями (СНиП 2.05.06–85) с учетом критериев оценки сопротивления иницированию и развитию вязких и хрупких разрушений.

Определены стандартные основные прочностные и пластические свойства, характеристики вязкости, хладостойкости, сопротивления протяженным разрушениям (на полнотолщинных образцах типа DWTT), а также структурные особенности состояния металла.

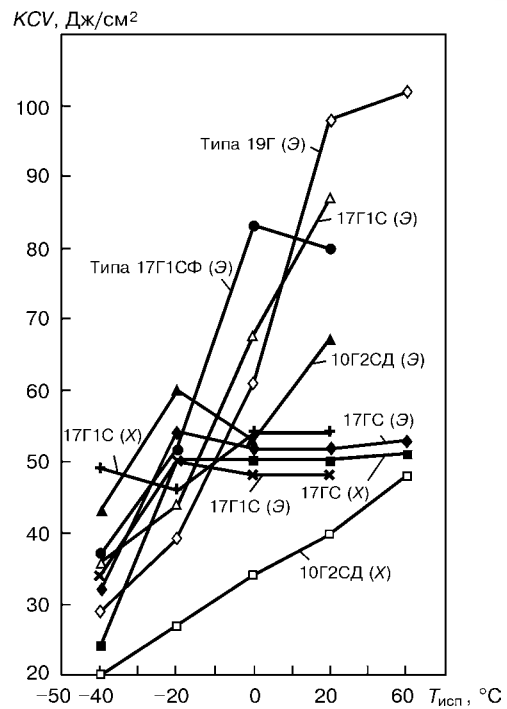


Рис. 2. Ударная вязкость основного металла исследованных труб

Сопротивление иницированию и стабильному развитию вязкой трещины определяли с помощью деформационных критериев: раскрытия вершины дефекта в момент иницирования вязкой трещины δ_0 и угла раскрытия вязкой трещины при ее стабильном развитии $\text{tg } \alpha$ [4].

Оценивали возможное изменение различных показателей металла труб относительно их исходного состояния. Свойства металла труб в этом состоянии устанавливали на основе анализа требований нормативной документации, обработки данных сертификатов. При определении влияния эксплуатационных нагрузок учитывали также результаты испытаний труб аварийного запаса.

Химический состав металла труб из всех исследованных сталей по результатам контрольного анализа соответствовал нормативным требованиям, а структурные параметры основного металла и металла швов были в основном характерными для применяемых марок сталей и типов сварных соединений.

Результаты механических испытаний образцов основного металла приведены на рис. 1–3.

Эксперименты показали, что все служебные характеристики основного металла исследованных труб (кроме бесшовной) после длительной эксплуатации удовлетворяли требованиям нормативной документации, в соответствии с которой они были изготовлены, и находятся в поле разброса или на уровне аналогичных показателей металла труб в исходном состоянии. Это касается и труб аварийного запаса.

Металл бесшовной трубы диаметром 508 мм производства ЧССР имеет пониженные значения предела текучести и временного сопротивления. Указанные отклонения обусловлены недостаточным легированием стали бесшовной трубы, нормативные требования к которому были ограничены только сверху ($C \leq 0,18 \%$, $Mn \leq 1,5 \%$). Понижен-



Таблица 1. Характеристики металла исследованных труб

| Марка стали | Состояние металла труб | $\epsilon_v, \%$ | σ_T/σ_B | $\delta, \text{мм}$ | n | $\text{tg } \alpha$ |
|-------------------|------------------------|------------------|---------------------|---------------------|------|---------------------|
| 17ГС | Э | 18,0 | 0,68 | 0,10 | 0,15 | 0,15 |
| | Х | 16,0 | 0,71 | 0,08 | 0,13 | 0,12 |
| 10Г2СД | Э | 19,8 | 0,72 | 0,09 | 0,17 | 0,15 |
| | Х | 19,3 | 0,64 | 0,07 | 0,16 | 0,17 |
| Типа 19Г | Э | 18,8 | 0,58 | 0,17 | 0,15 | 0,19 |
| Типа 17Г1СФ | Х | 11,6 | 0,70 | 0,10 | 0,10 | 0,11 |
| 17Г1С (Ø 1020 мм) | Э | 14,0 | 0,67 | 0,08 | 0,12 | 0,12 |
| 17Г1С (Ø 1220 мм) | Х | 18,8 | 0,74 | 0,13 | 0,15 | 0,14 |

ной исходной прочности способствовала также крупнозернистая структура металла данной трубы. Следует отметить, что характеристики прочности металла отдельных сварных труб, в частности σ_T металла трубы диаметром 1020 мм из стали 17Г1С и σ_B металла трубы диаметром 720 мм из стали 17ГС, находятся на нижнем граничном уровне соответствующих требований (см. рис. 1), что в общем свидетельствует о недостаточных гарантиях прочности металла труб соответствующего периода их производства.

Металл образцов с острым надрезом в интервале температур +60...-40 °С имеет достаточную ударную вязкость вплоть до температуры -20 °С для всех исследованных труб, за исключением трубы аварийного запаса из стали 10Г2СД (см. рис. 2). В металле указанной трубы значение ударной вязкости соответствует нижнему уровню, требуемому современными нормами. Температура перехода в хрупкое состояние металла исследованных труб составляла 0 °С и ниже, за исключением бесшовной

Таблица 2. Механические свойства металла продольных сварных соединений исследованных труб

| Марка стали | Состояние труб | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $KCU^{-40}, \text{Дж/см}^2$ | |
|--------------------|----------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | | | металла шва | металла ЗТВ |
| 17ГС | Э | <u>551,0...551,6</u> 551,3 | <u>60,7...67,7</u> 65,3 | <u>60,8...68,5</u> 63,2 |
| | Х | <u>551,3...559,5</u> 555,3 | <u>50,8...64,8</u> 58,0 | <u>69,1...76,7</u> 71,2 |
| | С | <u>511,0...617,4</u> 571,9 | Не определяли | |
| 10Г2СД | Х | <u>524,3...524,4</u> 524,4 | <u>76,6...97,6</u> 87,1 | <u>60,8...68,5</u> 63,2 |
| | С | <u>555,0...570,0</u> 563,0 | <u>41,0...136,5</u> 75,0 | Не определяли |
| Типа 17Г1СФ | Э | <u>595,9...606,1</u> 601,0 | <u>47,1...53,0</u> 54,3 | <u>43,5...62,5</u> 53,5 |
| | С | <u>650,0...694,0</u> 688,0 | <u>42,0...57,0</u> 53,0 | Не определяли |
| 17Г1С (Ø 1020, мм) | Х | <u>498,0...499,0</u> 499,0 | <u>71,6...73,3</u> 72,3 | <u>61,6...72,3</u> 67,0 |
| 17Г1С (Ø 1220, мм) | Э | <u>533,0...533,0</u> 533,0 | <u>25,5...38,0</u> 31,7 | <u>63,0...65,6</u> 64,3 |
| | С | <u>558,2...583,0</u> 568,4 | Не определяли | |

* При температуре -20 °С.
** При температуре -55 °С.

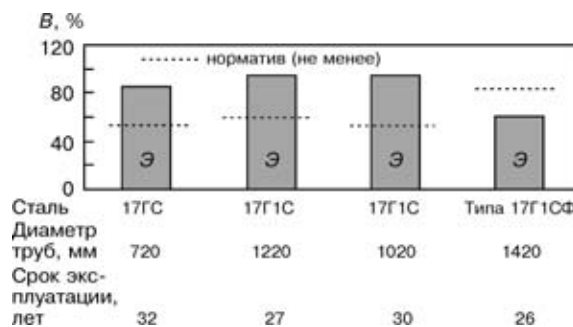


Рис. 3. Доля вязкой составляющей В в изломе образцов DWTT при температуре испытаний 0 °С

трубы с температурой перехода в хрупкое состояние металла 20 °С.

В целом ударная вязкость металла труб после длительной эксплуатации и труб аварийного запаса мало отличается от ее сертификатных значений для соответствующих материалов.

Нужно отметить, что свойства металла труб, которые находились в эксплуатации, существенно не отличаются от таковых металла труб аварийного запаса (после длительного хранения).

Сопротивление протяженному разрушению, оцениваемое по доле вязкой составляющей в изломе образцов DWTT, не во всех исследованных трубах соответствует нормам СНиП 2.05.06-85 (рис. 3). В частности, пониженное сопротивление разрушению при температуре 0 °С выявлено в металле трубы диаметром 1420 мм производства ФРГ.

Характеристики сопротивления вязким разрушениям металла труб приведены в табл. 1. Очевидно, что деформационный показатель трещиностойкости металла исследуемых труб δ находится в пределах, обычных для низколегированных сталей [5]. Несколько пониженные показатели указанных характеристик обнаружены у металла труб производства ФРГ.

Модуль разрыва или критический угол раскрытия берегов вязкой трещины $\text{tg } \alpha$ также соответствует пределам, характерным для исследованных типов стали.

Следовательно, заметного ухудшения трещиностойкости металла труб после длительной эксплуатации не обнаружено. Сравнительно невысокие значения σ_T/σ_B и соответствующие им повышенные показатели деформационного упрочнения n , а также значения равномерной критической деформации свидетельствуют о возможности обеспечения достаточной деформационной способности металла в условиях нагружения труб.

Металл сварных соединений всех исследованных труб (кроме одной) с достаточным запасом удовлетворяет установленным требованиям по прочностным и вязкостным свойствам (табл. 2, рис. 4). Низкая прочность разрушившегося по основному металлу сварного соединения трубы диаметром 1020 мм из стали 17Г1С (про-

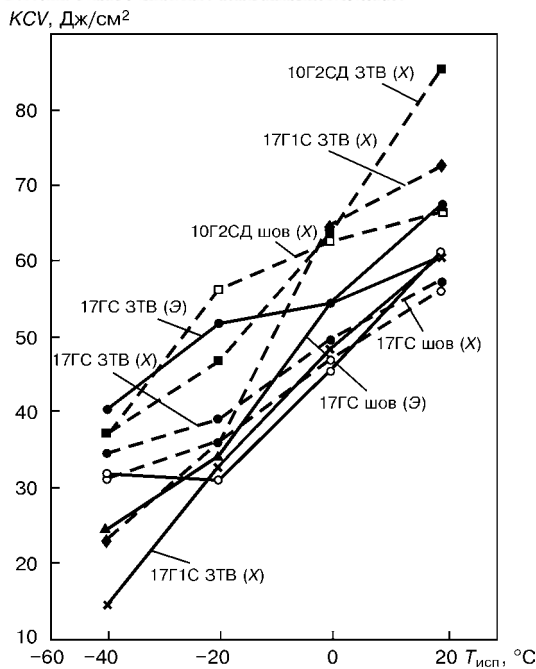


Рис. 4. Ударная вязкость металла продольных сварных соединений исследованных труб

изводства НТЗ) обусловлена пониженным уровнем прочностных свойств основного металла.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают возможность сохранения служебных свойств металла трубопроводов в условиях длительного силового нагружения (в течение плановых и даже сверхплановых сроков эксплуатации).

При длительной эксплуатации работоспособность газопроводов будет определяться не столько связанным со старением общим ухудшением свойств трубного металла, сколько другими факторами, способствующими локальному повреждению материала.

Уже упоминалось о том, что ранее трубы изготавливались без учета современных требований. Тем не менее, горячекатаные и нормализованные трубные стали первых поколений, образцы которых исследовали в работе [2] и в настоящей, в большинстве случаев вполне соответствуют условиям эксплуатации газопроводов в районах с умеренным климатом (в том числе в Украине). С точки зрения обеспечения служебных свойств металла самые большие опасения могут вызывать газопроводы диаметром 1420 мм, построенные с использованием труб из нормализованных сталей. Действительно, как следует из приведенных данных, металл таких труб (производства ФРГ) не вполне надежен в отношении сопротивления протяженному разрушению.

Для труб прежнего производства с недостаточными технологическими гарантиями требуемого качества особое значение приобретает выявление и устранение дефектов, снижающих прочность трубопроводов. Значительную опасность могут представлять дефекты в зонах холодного деформирования, поскольку при этом заметно ухудшается сопротивление разрушению металла труб.

При обсуждении результатов проведенных исследований, на наш взгляд, целесообразно остановиться на некоторых вопросах общего характера,

которые в первую очередь касаются методологии определения состояния материала действующих магистральных трубопроводов. Различные оценки явлений старения металла трубопроводов свидетельствуют прежде всего о сложности данной проблемы и значительных трудностях прогнозирования последствий продолжительной эксплуатации. Это подтверждает высказанное в работе [1] мнение о целесообразности дифференциального подхода к оценке текущего состояния металла действующих трубопроводов в зависимости от конкретных условий эксплуатации, внешних воздействий, исходных характеристик материала и т. п. В большинстве проведенных исследований отмечается незначительное влияние условий эксплуатации на стандартные механические свойства металла труб. Это практически нивелирует значение фактора старения металла при расчетах на прочность магистральных трубопроводов в рамках традиционно принятых подходов. Такая оценка приемлема только для материала без дефектов, способного к пластическому (вязкому) разрушению при заданных температурно-силовых нагрузках.

Что касается старых трубопроводов, тем более с пониженными значениями характеристик сопротивления разрушению материала, то подобный подход к оценке прочности является недостаточным. На основе реальных остаточных свойств металла труб необходимо выполнить расчетную оценку прочности трубопровода с такими дефектами металла, параметры которых, согласно действующей нормативной документации, считаются допустимыми.

Решение этой и других подобных задач требует комплексного нормативного и технологического обеспечения, включая методики расчетной оценки прочности, определение параметров дефектности и свойств материала, правила обследования, восстановления поврежденных участков и др.

Если рассматривать влияние фактора времени, то практически во всех случаях отсутствуют образцы-свидетели, на основании которых можно было бы выполнить наиболее достоверную оценку изменений параметров состояния материала. Очевидно также, что полностью отсутствует информация об исходных характеристиках материала, которые определяются новыми методами испытаний. Отметим, что некорректная оценка уровня исходных свойств может привести к ошибочным выводам относительно последствий процессов старения.

Как подчеркивалось в работе [1], нельзя игнорировать некоторые особенности трубного металла, например, довольно существенный разброс исходных значений механических свойств или изменений качественных характеристик в разные периоды времени, что связано с широкомасштабностью производства трубной стали и труб, особенно в прошедшие годы, а также с усовершенствованием производственных технологий.

Таким образом, оценка текущего состояния металла с точки зрения его пригодности к эксплуатации при заданных условиях должна производиться с обязательным учетом уровня качества труб прежнего производства.



Самостоятельный интерес представляет изучение состояния металла отдельных участков трубопроводов, на которых вследствие нештатных ситуаций и особых обстоятельств возникают условия, способствующие повреждению металла по причине наводороживания, холодного пластического деформирования, поличастотного нагружения, разных химико-механических воздействий.

Разнообразие возможных явлений требует проведения более широких исследований с целью выявления специфических признаков, которые сопровождают развитие тех или иных процессов старения. Комплекс таких исследований выходит за рамки процедуры контроля и испытаний при изготовлении трубной продукции.

Существенной помощью при решении этих задач может стать классификация состояний материала, например на основании приведенного в работе [1] подхода. На наш взгляд, в дальнейшем целесообразно разработать для типичных групп трубных сталей шкалу предельных параметров, характеризующих работоспособное, частично работоспособное и предаварийное состояния материала.

Выводы

1. Проведенные исследования образцов основного металла и сварных соединений, вырезанных из «старых» магистральных газопроводов, проложенных на территории Украины, после эксплуатации сроком до 35 лет подтвердили возможность сохранения приемлемых служебных свойств металла труб в плановые и даже сверхплановые сроки эк-

сплуатации. Таким образом, для обеспечения длительной эксплуатационной надежности «старых» газопроводов наиболее важное значение имеет выявление и устранение опасных дефектов в металле труб и сварных соединений.

2. В связи с несовершенством комплекса первоначальных технических требований к трубам особого внимания заслуживает оценка состояния действующих газопроводов (или участков газопроводов), при строительстве которых в 1950–1970-х гг. применялись трубы с недостаточными технологическими гарантиями качества. Существенное значение при диагностических обследованиях и реабилитации таких газопроводов имеет идентификация уложенных труб, оценка уровня технических характеристик и стабильности качества используемых материалов.

1. *О старении и оценке состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов* / Б. Е. Патон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
2. *Экспериментальная оценка состояния металла длительно работающих сварных нефтепроводов* / С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков, В. И. Кирьян и др. // Там же. — 2001. — № 5. — С. 18–22.
3. *Лейкин И. М., Литвищенко Д. А., Рудченко А. В.* Производство низколегированных сталей. — М.: Металлургия, 1972. — 255 с.
4. *Гиренко В. С., Семенов С. Е., Гончаренко Л. В.* Деформационное старение трубных сталей // Техн. диагностика и разрушающий контроль. — 2001. — № 3. — С. 32–35.
5. *Патон Б. Е., Труфяков В. И., Кирьян В. И.* Требования к вязкости стали для магистральных газопроводов при постановке в них гасителей протяженных разрушений // Автомат. сварка. — 1982. — № 12. — С. 5–7.

Service properties of pipe samples, cut out of operating pipelines, as well as pipes of emergency stock were studied. Possibility of preservation of pipe metal performance after long-term operation is demonstrated. It is established that lowering of strength indices of the metal of individual pipes, compared to standard values, is not related to the influence of service loads. To provide a reliable service of old pipelines, it is necessary to detect and repair hazardous metal defects, as well as conduct diagnostic investigations with identification of the laid pipes, evaluation of the level of technical characteristics and uniformity of quality.

Поступила в редакцию 24.09.2002,
в окончательном варианте 25.11.2002

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ»

15–16 мая 2003 г.

г. Могилев, Беларусь

ОРГАНИЗАТОРЫ: Минобразования РБ, Могилевский облисполком, НАН РАБ

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

- ✓ прогрессивные технологические процессы, механизмы и средства автоматизации
- ✓ технологии получения и обработки новых материалов и покрытий
- ✓ прогрессивные технологии сварки, наплавки и контроля металлических конструкций
- ✓ проектирование, производство и эксплуатация строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин
- ✓ прогрессивные технологии в строительстве, строительные материалы и конструкции
- ✓ проектирование, производство и эксплуатация транспортных средств
- ✓ приборы и методы контроля качества и диагностики состояния объектов
- ✓ электропривод и автоматизация технологических процессов

Адрес оргкомитета: Республика Беларусь, 212005 г. Могилев, пр-т Мира 43, корп. 3
Тел./факс: (+375222) 225821; (+375222) 236422; E-mail: jsk@mgtu.mogilev.unibel.by