



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ СВАРНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

С. Е. СЕМЕНОВ, А. А. РЫБАКОВ, В. И. КИРЬЯН, Т. Н. ФИЛИПЧУК, Л. В. ГОНЧАРЕНКО

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

В. М. ВАСИЛЮК, Р. В. КЛИМОНЧУК (ГАО «Магистральные нефтепроводы «Дружба», г. Львов),

М. В. СТЕЦЬКИВ, Ф. С. ВЛАСЮК (ГАО «Приднепровские магистральные нефтепроводы», г. Кременчуг)

Приведены результаты комплексных исследований образцов труб, вырезанных из нефтепроводов, включающие гидравлические трубной секции до разрушения. Установлено сравнительно слабое влияние факторов длительного силового нагружения на механические свойства и ресурс пластичности материалов, а также сохранение высокой конструкционной прочности обследованных трубопроводов после длительной эксплуатации.

Ключевые слова: трубопровод, эксплуатация, материал, состояние, старение, исследование, гидравлические испытания, механические свойства

Для правильной оценки опасности явлений старения важное значение имеет накопление информации о реальном состоянии металла длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов. В связи

с этим от проложенных по территории Украины нефтепроводов были отобраны и исследованы образцы основного металла и сварных соединений. Анализ результатов проведенных исследований изложен в работе [1]. Поскольку в других подобных исследованиях [2–4] содержатся иные оценки последствий старения материалов трубопроводов, це-

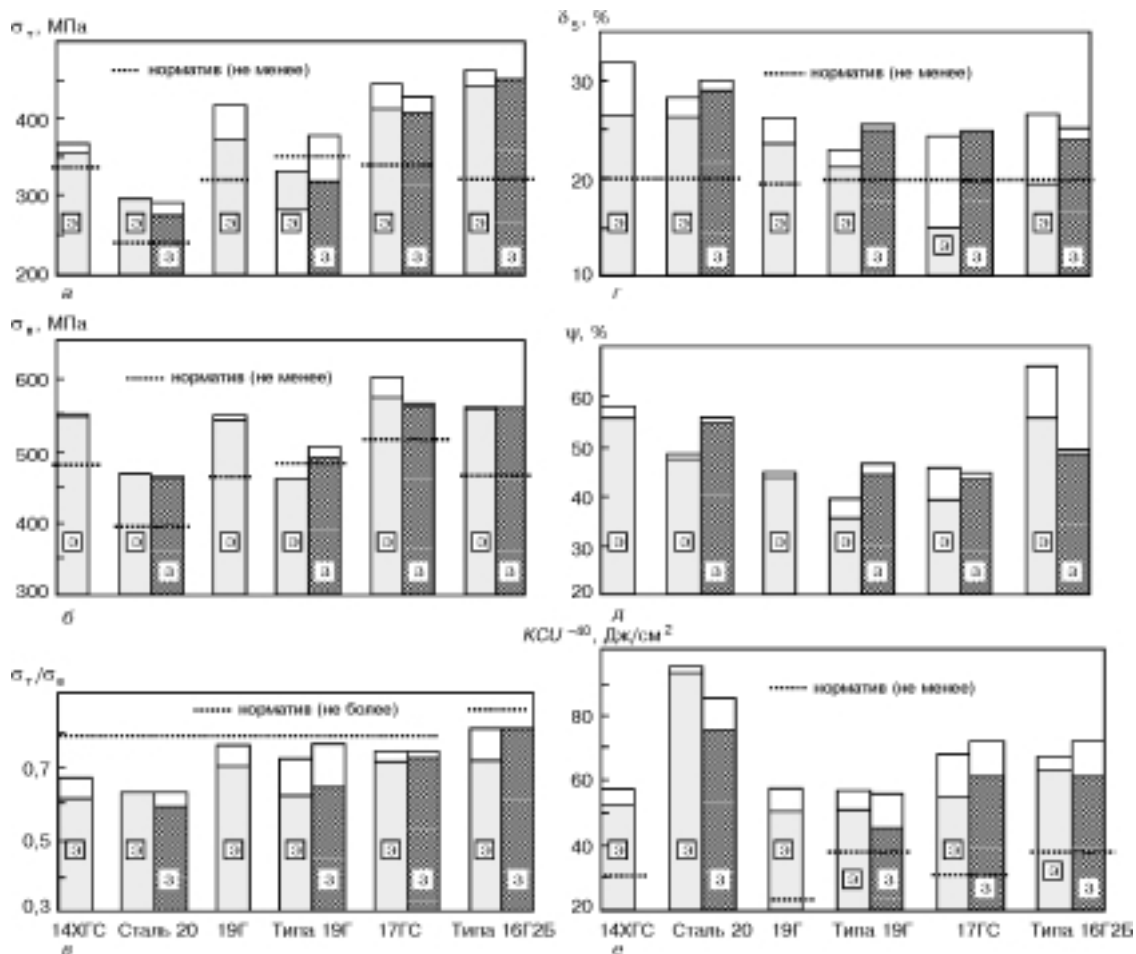


Рис. 1. Характеристики механических свойств основного металла исследованных труб (а-е); Э — трубы после эксплуатации; З — трубы аварийного запаса; светлая зона — область разброса значений

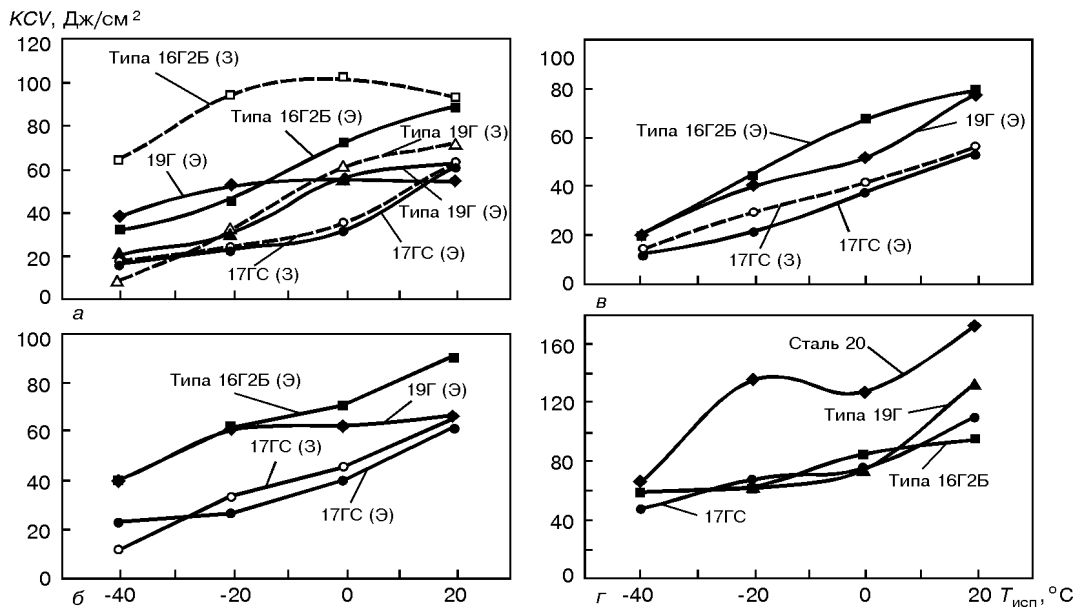


Рис. 2. Ударная вязкость металла исследованных образцов труб (а-в) (а — основной металл; б — металл шва; в — металл ЗТВ) и металла шва кольцевых монтажных соединений (г)

Таблица 1. Механические свойства металла сварных швов исследованных труб

Испытуемый материал	Размер труб, мм, сталь	σ_r , МПа	σ_b , МПа	σ_r/σ_b	δ_5 , %	ψ , %	KCU^{-40} Дж/см ²
Металл шва заводских продольных сварных соединений	720×9, 17ГС	441,2	560,8	0,78	23,0	54,0	60,4
	720×8, типа 16Г2Б	523,7	652,7	0,80	26,7	63,7	74,3
	720×8, 19Г	422,5	544,5	0,80	20,9	54,5	72,5
Металл шва монтажных кольцевых сварных соединений	720×9, 17ГС	474,7	602,5	0,78	29,0	54,2	101,7
	377×9, сталь 20	—	—	—	—	—	110,0
	720×8, типа 16Г2Б	443,4	548,1	0,81	25,7	61,5	62,8
	720×9, типа 19Г	400,7	555,3	0,72	27,4	70,3	101,7
	720×8, 19Г	383,7	541,5	0,70	22,1	61,8	50,4

Таблица 2. Механические свойства основного металла отдельных патрубков секции, подвергнутой гидравлическому испытанию

Размер труб, мм, сталь	Степень раздачи патрубка, %	σ_r , МПа	σ_b , МПа	σ_r/σ_b	δ_5 , %	ψ , %	KCU^{-40} Дж/см ²	KCV^{20} Дж/см ²
720×8, 19Г	1,24	430,3	515,8	0,83	20,17	44,9	84,2	79,5
	1,72	428,2	505,7	0,85	18,6	44,2	58,7	67,8
	1,98	453,3	519,6	0,86	23,6	39,9	56,7	48,0
720×8, 14ГН	1,63	438,3	500,6	0,87	24,2	42,4	48,3	38,8
	2,98	453,3	519,6	0,87	18,5	40,6	42,3	35,0

лесообразно более детальное рассмотрение отдельных аспектов изучаемой проблемы.

В настоящей статье приведены сведения преимущественно о механических свойствах исследованных образцов материалов. Результаты исследований, касающиеся других свойств материалов, будут изложены в самостоятельных работах.

Исследовали основной металл горячекатаных бесшовных и сварных прямошовных труб диаметром 377...720 мм, изготовленных на предприятиях бывших СССР, ЧССР и Франции, а также заводские и монтажные сварные соединения этих труб. Бесшовные трубы представлены образцами из сталей 20 (производства ЧТПЗ) и типа 19Г (производ-

ства трубного завода ЧССР). Исследовали также образцы, вырезанные из горячеправленных и экспандированных сварных труб, изготовленных Челябинским и Харцызским заводами, а также трубным заводом Франции из стали марок 19Г, 17ГС, 14ГН, 14ХГС, типа 16Г2Б. Все нефтепроводы, из которых отбирали образцы, проработали длительное время — от 20 до более 35 лет.

Оценивали соответствие механических свойств металла нефтепроводов после длительного периода эксплуатации (а также труб аварийного запаса) нормативным требованиям, установленным к трубам в исходном состоянии, и соответственно изменение различных показателей свойств металла под



Таблица 3. Механические свойства металла швов сварных соединений труб, подвергнутых гидравлическому испытанию

Испытуемый материал	Размер труб, мм, сталь	Степень раздачи патрубка, %	σ_T , МПа	σ_B , МПа	σ_T/σ_B	δ_5 , %	ψ , %	KCU^{-40} Дж/см ²
Металл шва продольных сварных соединений	720×8, 19Г	1,24	407,5	521,5	0,78	21,8	51,9	60,6
		1,98	419,8	536,0	0,79	20,0	49,0	62,0
		1,63	395,0	517,8	0,77	21,8	53,0	66,6
		2,98	420,3	537,0	0,79	20,0	50,9	70,8
Металл шва монтажных кольцевых сварных соединений	720×8, 19Г	1,98	497,3	577,7	0,83	19,3	54,4	59,6

действием длительных эксплуатационных нагрузок.

Характеристики труб в исходном состоянии в зависимости от наличия данных определяли на основе анализа требований нормативно-технической документации (НТД), статистической обработки сертификатов, литературных данных и архивных материалов.

Проведенные исследования показали, что в основном контролируемые параметры (химический состав стали, механические свойства и микроструктура основного металла и металла продольных и кольцевых монтажных сварных соединений) соответствовали нормативным требованиям и мало отличались либо предопределялись исходным состоянием материала.

Результаты испытаний (рис. 1) показали, что характеристики механических свойств образцов основного металла исследованных труб из различных марок стали после длительной эксплуатации находятся в поле разброса аналогичных показателей металла труб в исходном состоянии (в основном в пределах стандартного отклонения $\pm\sigma$ от среднего значения показателя). При этом, как правило, все контролируемые характеристики металла труб после длительной эксплуатации удовлетворяют нормативным требованиям. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении металла труб аварийного запаса, подвергавшегося естественному старению в течение длительного вылеживания. Исключение составили бесшовные трубы из стали типа 19Г диаметром 720 мм производства ЧССР, металл которых имеет пониженные по сравнению с НТД и сертификатами данными показатели предела текучести и временного сопротивления разрыву, а также одна из испытанных сварных труб диаметром 720 мм производства ЧТПЗ из стали 17ГС с относительным удлинением основного металла менее 20 %. Однако эти отклонения можно объяснить нарушением технологии изготовления стали, что привело к формированию аномальной структуры стали 17ГС или к недостаточному базовому легированию стали типа 19Г. Обнаружено также повышение по сравнению с сертификатными данными отношения σ_T/σ_B металла труб из стали типа 16Г2Б. Следует иметь в виду, что данная сталь изготовлена в период освоения промышленной технологии контролируемой прокатки, поэтому нельзя исключить возможность чрезмерного упрочнения металла отдельных партий при прокатке с интенсивным обжатием в γ - α температурной области. Вместе с тем, вопросы возможного изменения механических свойств трубной ста-

ли, упрочняемой путем термомеханической обработки, под влиянием факторов, которые способствуют старению металла, заслуживают более глубокого изучения.

Температурные зависимости ударной вязкости металла исследованных образцов (рис. 2) характеризуются постепенным уменьшением ее значения по мере понижения температуры, что достаточно типично и для аналогичных трубных сталей в исходном состоянии. При электронно-фрактографических исследованиях поверхностей изломов не выявлены признаки межзеренного разрушения, которые также могли бы свидетельствовать о развитии достаточно опасных явлений старения металла. Металл всех исследованных сварных соединений как продольных, так и кольцевых характеризуется достаточно высокими прочностными, пластическими и вязкими свойствами (табл. 1, рис. 2), в целом типичными для применявшихся при изготовлении труб и монтаже трубопроводов технологий сварки.

Следовательно, полученные данные свидетельствуют о сравнительно слабом влиянии факторов длительного силового нагружения либо естественного старения на материал нефтепроводных труб.

Неразрушающий контроль и анализ макрошлифов кольцевых сварных соединений показал, в частности, что в металле швов в значительном количестве имеются технологические дефекты в виде смещения кромок, непроваров, скоплений шлаковых включений и пор. Однако, как установлено при металлографических исследованиях, развитие дефектов в условиях нагружения при эксплуатации не наблюдалось. Не зафиксировано также упрочнения металла вблизи дефектов шва, что свидетельствовало бы о накоплении локальных пластических деформаций.

Таким образом, в процессе длительной эксплуатации ни один из определяемых показателей механических свойств (σ_T , σ_B , δ_5 , ψ , KCU^{-40} , KCV^0) материала нефтепроводов не претерпел значительных изменений под влиянием эксплуатационных нагрузок либо долговременного вылеживания без силовых воздействий. Все показатели отвечают требованиям НТД, а наблюдаемые отклонения от норм σ_T , σ_B , δ_5 основного металла отдельных труб обусловлены соответствующими особенностями структурных характеристик исходных сталей и несовершенством технологий на этапе их изготовления.

Представляют интерес результаты проведенных гидравлических испытаний образцов труб из сталей 19Г и 14ГН, вырезанных из действующего нефтепровода, после длительного периода эксплуатации.

В ходе испытания секция, составленная из патрубков с вмятинами различного размера и конфигурации, разрушилась по телу патрубка из стали 14ГН вне зон вмятин и сварных швов при давлении 10,69 МПа, что значительно превышает проектное рабочее давление в нефтепроводе. При этом значении давления напряжение в патрубке составило 511,1 МПа, что соответствует нормативному пределу прочности стали. Разумеется, что, исключая собственно зону разрыва, состояние предразрушения было достигнуто только в разрушившемся патрубке испытательной секции. Критическая деформация тела трубы к моменту потери пластической устойчивости (образования зоны разрыва), оцениваемая по увеличению периметра вне зоны разрыва, составляет примерно 3 %, что в целом близко к аналогичному показателю труб рассматриваемого периода производства.

В других патрубках секции при гидроиспытаниях металл также подвергался довольно значительному холодному пластическому деформированию. Изучение характеристик металла нагруженной испытанной секции позволяет получить некоторое представление о «запасах работоспособности» металла длительно эксплуатировавшихся трубопроводов. Как показали дальнейшие испытания (табл. 2), дополнительная холодная пластическая деформация, значение которой (при оценке по увеличению периметра трубы) составило 1,24... 2,98 %, привела к закономерному повышению значений σ_T , σ_T/σ_B и некоторому снижению значений δ_5 , ψ основного металла труб. Так, если в трубах после длительной эксплуатации отношение σ_T/σ_B , оцениваемое по средним значениям, для разных марок стали, исключая сталь типа 16Г2Б, находилось в пределах 0,63... 0,76, то после деформирования в ходе гидравлического испытания оно повысилось до 0,83... 0,87. Сравнительные значения относительного удлинения соответственно составили 20,6... 28,8 и 18,5... 24,2 %, а относительного сужения — 45,5... 55,5 и 39,9... 44,9 %.

Значения ударной вязкости металла испытанной секции превышают нормативные требования, однако, снижается уровень ударной вязкости на «верхней полке» ее температурной зависимости. Наблюдается также более резкий переход от вязкого к хрупкому состоянию материала при понижении температуры.

Принято считать, что литой металл, отличающийся повышенной неоднородностью и неравномерностью структурного состояния, более склонен к старению, нежели металл, подвергаемый последующей горячей деформации либо улучшающей термообработке. Как отмечалось выше, механические свойства металла исследованных швов трубопроводов не претерпели существенных изменений в процессе длительных эксплуатационных воздействий. Кроме того, дополнительное нагружение с остаточной деформацией патрубков также существенно не отразилось на механических свойствах металла продольного шва сварных соединений труб (табл. 3). Можно отметить тенденцию упрочнения и снижения таких показателей, как относительное удлинение и относительное сужение металла шва.

Тем не менее, значения относительного удлинения остаются практически на уровне требований, предъявляемых к основному металлу. Относительно слабая реакция металла швов на раздачу труб в упругопластической области нагружения внутренним давлением, очевидно, связана с повышенной местной жесткостью и, следовательно, обусловлена меньшим деформированием металла шва по сравнению с металлом тела трубы.

В то же время отмечается более ощутимое влияние величины деформации патрубка на снижение ударной вязкости металла ЗТВ продольных сварных соединений. Так, при увеличении остаточной деформации по периметру трубы из стали 14ГН с 1,63 до 2,98 % ударная вязкость металла ЗТВ снижается в 1,5... 2 раза. Даже в состоянии предразрушения основного металла ударная вязкость металла ЗТВ при температуре 0 °С и выше имеет значения более 40,0 Дж/см².

Проведенные исследования позволяют заключить, что материал обследованных труб и сварных соединений после длительной эксплуатационной наработки сохранил близкие к начальным ресурсы пластичности и вязкости. Об этом достаточно убедительно свидетельствуют результаты проведенных гидравлических испытаний и оценка на их основе показателей механических свойств металла в предельном состоянии. Для достижения состояния предразрушения материал длительно эксплуатируемых труб потребовалось подвергнуть значительному холодному пластическому деформированию, что сопровождалось закономерным упрочнением металла. Можно предположить, что фактор интенсивности воздействий, в частности деформационных, если речь идет о влиянии деформационного старения, имеет наиболее существенное значение для развития явлений деградации служебных свойств металла труб.

Таким образом, длительная надежная эксплуатация магистральных нефтепроводов, если иметь в виду сохранение работоспособности основных несущих конструктивных элементов линейной части — металла труб и сварных соединений, представляется вполне возможной. Однако необходимо строго соблюдать нормативные условия нагружения трубопроводов, не допускать возникновения нештатных ситуаций, приводящих к перегрузкам, интенсивным циклическим и другим воздействиям, что в итоге может сопровождаться образованием деформированных зон и очагов разрушения.

Важно также не выпускать из поля зрения опасность предшествующих периоду эксплуатации возможных интенсивных технологических воздействий на материал, что наиболее характерно для местных зон нарушения формы, поверхностных надавов, раскатки, отклонения от регламентируемых условий сварки и пр. Как уже отмечалось [1], особое значение для обеспечения надежной эксплуатации трубопроводов имеет предупреждение образования, своевременное выявление и устранение различных опасных дефектов и повреждений, в зонах которых под действием приложенных нагрузок и агрессивных сред могут происходить значительные измене-



ния в материале, способствующие возникновению разрушений.

Полученные результаты представляют определенный интерес также с точки зрения методологии оценки состояния материала действующих трубопроводов. Для отслеживания понижения работоспособности либо наступления предаварийных ситуаций необходимы соответствующие критерии оценки. К наиболее надежным из них следует отнести характеристики сопротивления разрушению, в том числе показатели трещиностойкости. Достаточно полезную информацию можно получать в ходе изучения деформационных (геометрических), структурных характеристик, поведения дефектов и др. К оценке результатов стандартных механических свойств с точки зрения их соответствия нормативным требованиям следует подходить с определенной осторожностью.

Исследования металла труб после гидравлического испытания свидетельствуют о том, что низкие

пороговые нормативные уровни ударной вязкости (это особенно присуще трубам условного диаметра до 1000 мм) не позволяют надежно гарантировать удовлетворительное состояние трубного металла после длительной эксплуатации. Необходимы дополнительные оценки для установления действительного состояния металла.

1. *О старении* и методологии оценки состояния металла эксплуатируемых магистральных трубопроводов // Б. Е. Палтон, С. Е. Семенов, А. А. Рыбаков и др. // Автомат. сварка. — 2000. — № 7. — С. 3–12.
2. *Прогнозирование* остаточного ресурса прочности магистральных газонефтепроводов с учетом продолжительности эксплуатации // Ю. И. Пашков, Ю. И. Анисимов, Г. А. Ланчаков и др. // Стр-во трубопроводов. — 1996. — № 2. — С. 2–5.
3. *Ланчаков Г. А., Степаненко А. И., Пашков Ю. И.* Влияние времени эксплуатации на ресурс прочности трубопроводов // Газ. пром-сть. — 1994. — № 3. — С. 11–12.
4. *Старение* труб нефтепроводов / А. Г. Гумеров, Р. С. Зайнулин, К. Н. Ямалеев, А. В. Росляков. — М.: Недра, 1995. — 216 с.

Results of integrated investigations, including hydraulic tests of oil pipelines until their fracture, are given. Comparatively small effect of factors of long-term forced loading on the mechanical properties and ductility margin of materials and also the preserving of high structural strength of long-serviced pipelines examined were stated.

Поступила в редакцию 26.09.2000



Всероссийская конференция с международным участием

СВАРКА И КОНТРОЛЬ - 2001 Перспективные пути развития

18–20 сентября 2001 г.
г. Воронеж

ТЕМАТИКА

- ❖ *Теория сварочных процессов, конструкционные и сварочные материалы, сварные конструкции*
- ❖ *Технология и оборудование сварки плавлением, наплавки и резки*
- ❖ *Технология и оборудование сварки давлением*
- ❖ *Технология и оборудование сварки и смежных технологий с использованием концентрированных источников нагрева*
- ❖ *Технология и оборудование для поверхностного упрочнения и нанесения покрытий*
- ❖ *Методы и средства контроля и диагностики сварных соединений*
- ❖ *Автоматизация и компьютеризация сварочных процессов*
- ❖ *Сертификация продукции, оборудования, технологии, сварочных материалов и персонала в сварочном производстве*

Тел./факс: (0732) 716559, E-mail: alex@mk.vrn.ru