

УДК 622.692.4.053

## ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*А.Н. ЯНУШОНОК, канд. техн. наук, доц. В.К. ЛИПСКИЙ, В.Е. КОТОВ, Н.В. СОКОЛОВА  
(Полоцкий государственный университет);  
канд. техн. наук, доц. А.С. СНАРСКИЙ  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Срок эксплуатации большей части эксплуатируемых в Беларуси магистральных нефтепродуктопроводов превышает назначенный амортизационный срок. Авария на магистральных трубопроводах может привести к значительному экономическому, экологическому и социальному ущербу. В связи с этим встает актуальная задача оценки технического состояния эксплуатируемых конструкций.*

*Приведены результаты исследования технического состояния магистрального нефтепродуктопровода, принадлежащего ЧУП «Запад-Транснефтепродукт», «Унеча – Вентспилс» («Участок № 41»). Проведены расчеты предельно допустимого давления, основанные на данных внутритрубного диагностирования. Выполнена отработка методики исследования структуры и механических свойств металла трубопроводов, которая показала свою эффективность при определении фактического состояния трубопровода. Приведены результаты испытаний механических свойств металла труб и сварных соединений после длительной эксплуатации.*

**Введение.** Эффективность и экономическая целесообразность трубопроводного транспорта углеводородного сырья в настоящее время является общепризнанным фактом. При этом он оказывает минимальное, по сравнению с другими видами транспорта, вредное воздействие на окружающую среду. Однако положение коренным образом меняется при авариях, которые могут привести к экономическому и экологическому ущербу, несоизмеримому со стоимостью самого сооружения, к риску для жизни людей [1]. В связи с этим вопрос надежности магистральных трубопроводов является объектом постоянного внимания органов Государственного надзора в области промышленной, пожарной и экологической безопасности.

Сооружение магистральных нефтепродуктопроводов на территории Беларуси началось в начале шестидесятых годов, когда в Советском Союзе решались задачи обеспечения топливом военных баз и экспорта продуктов переработки нефти в страны Запада. У специалистов вызывает тревогу возрастной состав, проложенных по территории страны магистралей (срок эксплуатации большей части эксплуатируемых в Беларуси магистральных трубопроводов превышает заложенный Временным классификатором амортизационный срок эксплуатации, равный 33 годам). Тотальная замена магистральных трубопроводов потребует серьезных капиталовложений, в то время как они не исчерпали свой ресурс и могут продолжать функционировать. В связи с этим в настоящее время все большее применение находит концепция эксплуатации по техническому состоянию, основанная на прогнозе индивидуального остаточного ресурса трубопроводов. Применение этой концепции стало возможным благодаря использованию внутритрубных приборов для поиска и обнаружения дефектов и повреждений материала труб и их сварных соединений. Между тем используемые в настоящее время внутритрубные приборы не позволяют обнаружить все опасные дефекты (в первую очередь дефекты сварных соединений). Степень обнаружения опасных дефектов составляет примерно 40...50 % [2]. Кроме того, сварные соединения являются наиболее весомым фактором возникновения аварий на магистральных трубопроводах [3]. Таким образом, надежность и безопасность трубопроводов в значительной мере определяется состоянием сварных соединений.

**Анализ опасности дефектов нефтепродуктопровода.** В результате диагностических обследований выявляется значительное количество дефектов различного типа. На магистральном нефтепродуктопроводе ЧУП «Запад-Транснефтепродукт» «Участок № 41» по результатам внутритрубных диагностических обследований, выполненных компанией «Нефтегазкомплектсервис» в 2003 году, выявлено несколько сотен тысяч дефектов. Зарегистрированы дефекты следующих типов: дефекты стенки трубы (внутренняя и внешняя потери металла, расслоения, включения), дефекты геометрии трубы (вмятины и гофры), аномалии продольных и поперечных швов, классифицированные как смещения, несплошности плоскостного типа (непровары, трещины, несплавления). Из всего объема обнаруженных дефектов 99,8 % составляют коррозионные повреждения – «потеря металла». В то же время более 80 % данных дефектов составляют дефекты малых геометрических размеров – менее 20 % от толщины стенки трубопровода. Анализ распределения дефектов в окружном направлении (белорусский участок трассы), представленный на рисунке 1, показывает неравномерное распределение дефектов по длине нефтепродуктопровода. Это связано с разным возрастом эксплуатируемых труб (в течение эксплуатации происходила замена

участков трубопровода). На первой половине графика находится основная часть выявленных дефектов, что объясняется значительным возрастом проложенных труб, причем расположены они преимущественно в районе нижней образующей. Это связано с вынужденными простоями трубопровода, во время которых растворенная в перекачиваемом продукте вода отстаивалась и способствовала интенсификации коррозионных процессов. Равномерное распределение дефектов по окружности трубы на участках, с меньшим сроком эксплуатации, для которых характерно незначительное количество дефектов (участки Б и В), говорит о том, что наиболее вероятной причиной их возникновения является равномерный коррозионный износ. Для последнего участка, где эксплуатируется трубопровод диаметром 377 мм, также характерен равномерный коррозионный износ.

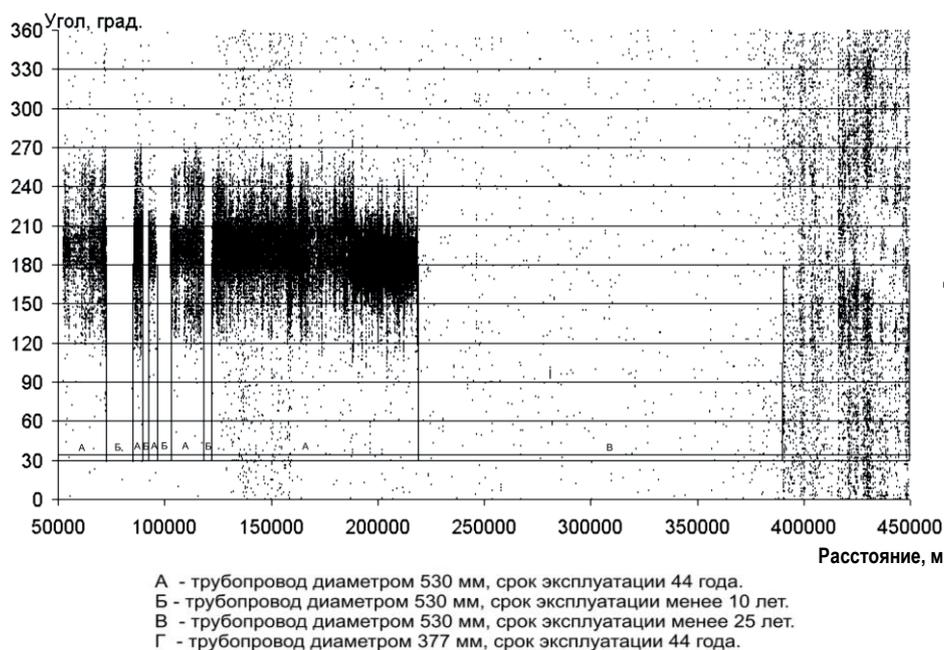


Рис. 1. Распределение дефектов по окружности «Участок № 41» по данным внутритрубного диагностического обследования, выполненного компанией «Нефтегазкомплектсервис»

Оценка технического состояния магистрального нефтепродуктопровода «Участок № 41» проводилась согласно СО 11-04-АКТНП-008-2007 [4]. На основании данных внутритрубного диагностического обследования определено предельно допустимое давление как для дефектных, так и бездефектных локальных участков нефтепродуктопровода.

Определение условий безопасной работы производилось с использованием аналитических и графических методов анализа. Анализ проводился в следующем порядке:

- на сжатом профиле трассы магистрального нефтепродуктопровода производилось построение линии гидравлического уклона на заданное рабочее давление на выходе перекачивающей станции;
- на сжатом профиле трассы магистрального нефтепродуктопровода – построение эпюры предельно допустимых давлений (напоров) на каждом локальном участке трубопровода в соответствии с фактическими данными толщины стенки и высотными отметками трубопровода в метрах столба перекачиваемого продукта;
- производился анализ расположения эпюры предельно допустимых давлений (напоров) относительно линий гидравлических уклонов.

Анализ полученных значений предельно допустимых давлений и распределения напоров по длине магистрального нефтепродуктопровода при различных режимах работы перекачивающих станций выявил ряд дефектов, предельно допустимое давление для которых оказалось меньше давления, создаваемого перекачивающей станцией на данном локальном участке трубопровода. Данные дефекты относятся к разряду «опасных» по первой группе предельных состояний и должны быть устранены. С повышением давления на входе в линейную часть количество дефектов, попадающих в категорию «опасных», возрастает. На основании исследования зависимости количества дефектов, попадающих в категорию «опасных», от давления на входе в линейную часть владельцу нефтепродуктопровода рекомендована эксплуатация при рабочем давлении, не превышающем 4,2 МПа, при условии устранения 20 «опасных» дефектов до конца 2008 года. Проведенные расчеты на назначенный ресурс 5 лет (до 31.12.2012 г.) формально позволяют эксплуатировать магистральный нефтепродуктопровод «Участок № 41» с давлением на выхо-

де линейной диспетчерской перекачивающей станции «8Н» 4,2 МПа. В то же время единичное обследование трубопровода не позволяет говорить о динамике развития обнаруженных дефектов и прогнозирования на столь длительный срок (10 лет с момента проведения диагностики) методически не обоснованно. В связи с этим владельцу трубопровода рекомендовано провести очередное внутритрубное диагностическое исследование с целью контроля изменения параметров дефектов и обнаружения вновь появившихся. В связи со значительной концентрацией дефектов и нецелесообразностью проведения локального ремонта на участках 86...97, 103...120, 123...190 км рекомендовано произвести замену данных участков трубопровода [5].

В процессе длительной эксплуатации в металле сварных соединений, как и в металле тела трубы, происходит изменение структурного состояния, приводящее к изменению его физико-механических свойств. Изменение структурного состояния металла связано с процессами деформационного и естественного старения, накопления дефектов в результате воздействия напряжений, коррозионной среды и водорода, малоциклового усталости металла. Указанные процессы непосредственно сказываются на механических свойствах. В общем виде изменения выглядят следующим образом: после длительной эксплуатации несколько возрастают прочностные характеристики (предел прочности и предел текучести), повышается твердость, значительно снижаются пластические характеристики (относительное удлинение, сужение), ударная вязкость и повышается температура перехода стали в хрупкое состояние. Деформационное старение трубных сталей состоит в перераспределении атомов углерода и азота в феррите, накоплении необратимых микропластических деформаций и распаде цементита, входящего в перлитные зерна. Это приводит к образованию частиц нитридов и карбидов. При дальнейшей деформации металла происходит дробление «сетки» нитридов и карбидов на границе зерен и блоков и генерация новых дислокаций, что приводит к уменьшению пластичности и увеличению твердости стали. Особенно сильно данный эффект проявляется в сварных соединениях, так как высокие температуры при сварке и последующее быстрое охлаждение интенсифицируют процессы старения [6].

**Исследование свойств основного металла и сварных соединений трубопровода.** С целью проверки соответствия требованиям существующих технических нормативных правовых актов проведены исследования свойств основного металла и сварных кольцевых соединений магистрального нефтепродуктопровода «Участок № 41» ЧУП «Запад-Транснефтепродукт», который эксплуатируется с 1964 года и был спроектирован на рабочее давление 64 кг/см<sup>2</sup>. Согласно имеющейся на предприятии документации нефтепродуктопровод состоит из труб различного диаметра 377, 530 и 720 мм, с толщиной стенки от 7 до 11 мм, изготовленных из следующих материалов: Сталь 20, Сталь 17ГС, Сталь 10Г2С1, Сталь 14ГН, Сталь 19Г, Сталь 14ХГС. С целью определения служебных свойств были отобраны 12 темплетов как дефектных, которые были вырезаны из действующего трубопровода при проведении плановых ремонтных работ, так и бездефектных, вырезанных специально для проведения исследования. Из них 7 имели диаметр 530 мм, 4 – диаметр 377 мм и 1 – диаметр 720 мм. Примерно в такой же пропорции находятся отношения длин эксплуатируемых труб каждого диаметра.

Согласно данным спектрального анализа химический состав исследованных образцов соответствует следующим материалам: Сталь 20, Сталь Ст 3сп, Сталь 17ГС, Сталь 10Г2С1, Сталь 14ГН.

Для исследований механических свойств основного металла и сварных стыковых соединений труб были вырезаны вдоль оси трубопровода плоские образцы в соответствии с ГОСТ 6996-66. Испытания на статическое растяжение плоских образцов без головок основного металла трубы проводились согласно ГОСТ 1497-84; испытания на статическое растяжение плоских образцов без головок сварных соединений – согласно ГОСТ 6996-66. Определялся угол изгиба при испытании на статический изгиб согласно требованиям ГОСТ 6996-66. Контроль указанных механических характеристик проводился с помощью разрывной машины Р-20. Исследования характеристик сопротивления хрупкому разрушению основного металла и сварных соединений проводились на образцах с U-образным при температуре –40 °С и V-образным надрезом при температуре –5 °С при помощи маятникового копра МК-30А согласно ГОСТ 9454-78 и ГОСТ 6996-66. Определение твердости проводилось с помощью твердомера ТК-2. Для макро- и микроисследований были приготовлены поперечные шлифы стыковых сварных соединений. Травление выполняли реактивом Ржешотарского. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе «Neophot-21» при увеличениях  $\times 100$ ,  $\times 400$  и  $\times 1000$ . При анализе структуры определяли величину зерна согласно ГОСТ 5639-82. При комплексном исследовании оценивалось соответствие служебных свойств металла труб и сварных соединений действующим на данный момент техническим нормативным правовым актам (ТНПА).

В результате проведенных исследований установлено, что показатели предела прочности, предела текучести, ударной вязкости, угла загиба и относительного удлинения не ниже значений, установленных требованиями ТНПА. Сварные соединения имеют более низкие механические характеристики по сравнению с основным металлом. Показатели предела прочности сварных соединений до 25 % ниже, чем у основного металла. Значения ударной вязкости имеют значительный разброс, но, тем не менее, систематически и значительно ниже (встречается снижение в два раза) показателей основного металла. Одной из

причин этого является высокая дефектность исследованных сварных соединений. В таблице представлены типичные механические свойства основного металла и сварных соединений исследованных образцов труб. В качестве примера приведены механические свойства труб, претерпевших длительную эксплуатацию и выполненных из Сталь 10Г2С1.

Типичные механические свойства исследованных образцов труб

№ участка	Характеристика вырезки	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\Delta$ , %	KCU <sup>-40</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	KCV <sup>-5</sup> , Дж/см <sup>2</sup>
5	Основной металл Сталь 10Г2С1	526	395	32	163	133
	Сварное соединение	470	–	–	88	39
1	Основной металл Сталь 10Г2С1	565	420	30,5	125	103
	Сварное соединение	455	–	–	95	65
2	Основной металл Сталь 10Г2С1	567	432	28,1	128	68
	Сварное соединение	530	–	–	69	48
Сталь 10Г2С1 согласно ГОСТ 19281-89		≥ 490	≥ 345	≥ 21	≥ 29,0	–

Микроструктура основного металла труб – ферритно-перлитная, характерная для низкоуглеродистой стали. Размер зерна соответствует 8...10 баллу. Выявлена деградация структуры металла, заключающаяся в перераспределении атомов углерода, скоплении их на границах зерен и образовании карбидных частиц (рис. 2, 3).

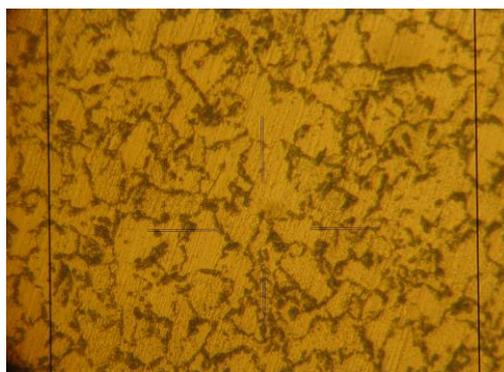


Рис. 2. Типичная микроструктура основного металла трубы, Сталь 10Г2С1, ×400

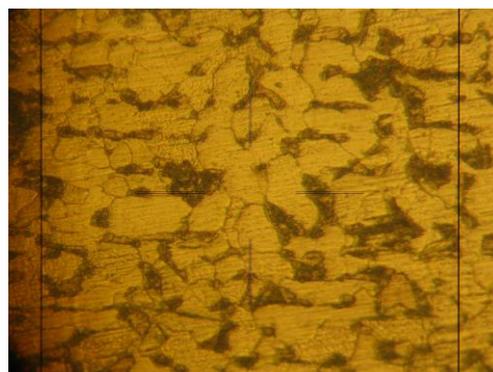


Рис. 3. Типичная микроструктура основного металла трубы, Сталь 14ГН, ×400

При исследовании микро- и макроструктуры сварных соединений в исследованных вырезках выявлен ряд дефектов, в том числе и недопустимых (несоответствие геометрических параметров сварных соединений, непровары по кромке и между валиками, поры и шлаковые включения). Структура облицовочного слоя сварного шва имеет характерное дендритное строение (рис. 4). Корневой и заполняющие слои сварного шва в процессе сварки подверглись рекристаллизации и имеют структуру, близкую к равноосной (рис. 5), по границам зерен наблюдается коагуляция карбидной составляющей.



Рис. 4. Типичная микроструктура металла облицовочного слоя, ×400

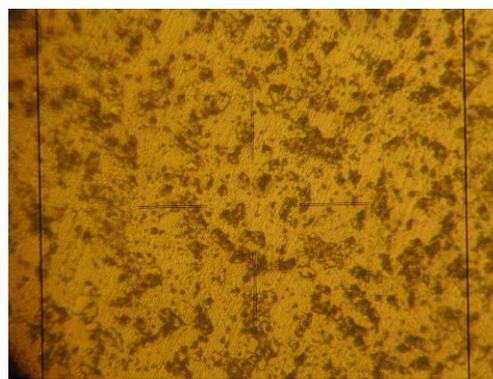


Рис. 5. Типичная микроструктура металла корневого шва, ×400

Зоны термического влияния основного металла представляют собой узкий участок перегрева (видманштеттова структура), переходящий в участок нормализации (рис. 6, 7). Твердость сварных швов, зоны термического влияния и основного металла труб удовлетворяет требованиям технических нормативных правовых актов к используемым маркам стали и сварным соединениям.

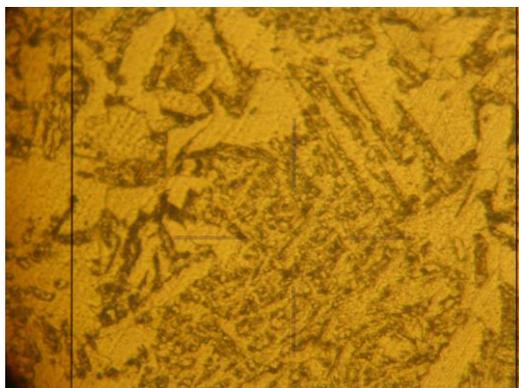


Рис. 6. Типичная микроструктура зоны термического влияния (видманштеттова структура),  $\times 400$

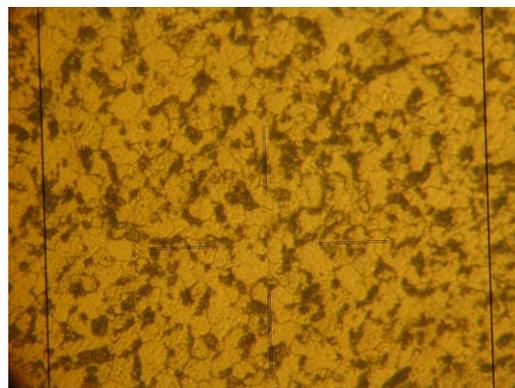


Рис. 7. Типичная микроструктура зоны термического влияния (участок нормализации),  $\times 400$

В настоящее время ведутся исследования влияния термической обработки на механические свойства и структуру сварных соединений магистральных нефтепродуктопроводов, проработавших длительное время, с целью восстановления деградировавших механических характеристик.

**Закключение.** На основании анализа рассчитанных значений предельно допустимых давлений и распределения напоров по длине магистрального нефтепродуктопровода при различных режимах работы перекачивающих станций обоснована возможность дальнейшей эксплуатации магистрального нефтепродуктопровода «Участок № 41». Определены возможные режимы работы перекачивающих станций из условия обеспечения надежности линейной части. Выполнена отработка методики исследования структуры и механических свойств металла трубопроводов, которая показала свою эффективность при определении фактического состояния трубопровода. Полученные данные о механических свойствах трубных материалов, претерпевших длительную эксплуатацию, используются для разработки и отладки метода повышения надежности магистральных трубопроводов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур, И.И. Конструктивная надёжность и экологическая безопасность трубопроводов / И.И. Мазур, О.М. Иванцов, О.И. Молдованов. – М.: Недра, 1990. – 264 с.
2. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров [и др.]. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. – 231 с.
3. Липский, В.К. Методика восстановительной термической обработки магистральных трубопроводов, основанная на неразрушающей оценке фактического уровня механических свойств металла / В.К. Липский, А.Н. Янушонок, А.С. Снарский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2006. – № 12. – С. 93 – 96.
4. Методика исследования фактических дефектов элементов труб, выявленных по результатам диагностики магистральных нефтепродуктопроводов ОАО «АК «Транснефтепродукт», и определение их влияния на остаточный ресурс нефтепродуктопроводов: СО 11-04-АКТНП-008-2007. – М., 2007.
5. Расчет несущей способности участка МНПП «8Н-Дисна» на основе фактических прочностных характеристик металла трубы: отчет о НИР / Полоц. гос. ун-т; рук. темы В.К. Липский. – Новополоцк, 2007. – 43 с.
6. Старение труб нефтепроводов / А.Г. Гумеров [и др.]. – М.: Недра, 1995. – 218 с.

Поступила 30.05.2008