

УДК 620.172:620.178:620.179.12:622.692.4.053-192

**МЕТОДИКА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ОСНОВАННАЯ НА НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ОЦЕНКЕ  
ФАКТИЧЕСКОГО УРОВНЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА**

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

*Срок эксплуатации большей части эксплуатируемых в Беларуси магистральных нефтепроводов превышает назначенный амортизационный срок. В связи с этим встают актуальные задачи обеспечения безопасности и надёжности магистрального трубопроводного транспорта*

*Рассматривается методика восстановительной термической обработки магистральных трубопроводов, основанная на неразрушающей оценке фактического уровня механических свойств металла.*

*Представлены результаты проведенной апробации работоспособности методики определения механических свойств стали на деталях неразрушающим методом с использованием метода определения твердости.*

**Введение.** Магистральные трубопроводы относят к ответственным инженерным сооружениям, авария которых может привести к экономическому и экологическому ущербу, несоизмеримому со стоимостью самого сооружения, и к риску для жизни людей. В связи с этим вопрос надежности магистральных трубопроводов нефти является объектом постоянного внимания органов Государственного надзора в области промышленной, пожарной и экологической безопасности.

Сооружение магистральных нефтепроводов на территории Беларуси началось в начале шестидесятых годов, когда в Советском Союзе решались задачи как обеспечения транспортирования сырой нефти на экспорт через западные границы и порт Вентспилс, так и снабжения нефтеперерабатывающих заводов Беларуси, Украины и Литвы. Характерная особенность построенных в 60 – 70-е годы советских трубопроводов – низкое качество строительного-монтажных работ и большое количество заводских дефектов труб, что подтверждается данными внутритрубных обследований линейной части. К этому добавляются дефекты, накопленные за весь период эксплуатации – коррозия, внешние механические повреждения, усталостные изменения механических свойств металла. В настоящее время условия работы трубопроводного транспорта нефти характеризуются естественным старением магистральных нефтепроводов, а также повышением требований к их экологической безопасности и необходимостью поддержания линейной части магистральных нефтепроводов в работоспособном состоянии для бесперебойного оказания транспортных услуг нефтяным компаниям. Срок эксплуатации большей части эксплуатируемых в Беларуси магистральных нефтепроводов превышает назначенный амортизационный срок. В то же время тотальная замена трубопроводов требует серьезных капиталовложений, а магистральные нефтепроводы не исчерпали свой ресурс и могут продолжать функционировать.

В связи с этим встают актуальные задачи обеспечения безопасности и надёжности магистрального трубопроводного транспорта, в частности трубопроводов, проработавших свыше амортизационного срока.

Согласно данным журналов регистрации аварий и инцидентов предприятий трубопроводного транспорта нефти Республики Беларусь за все время эксплуатации произошло 94 аварии.

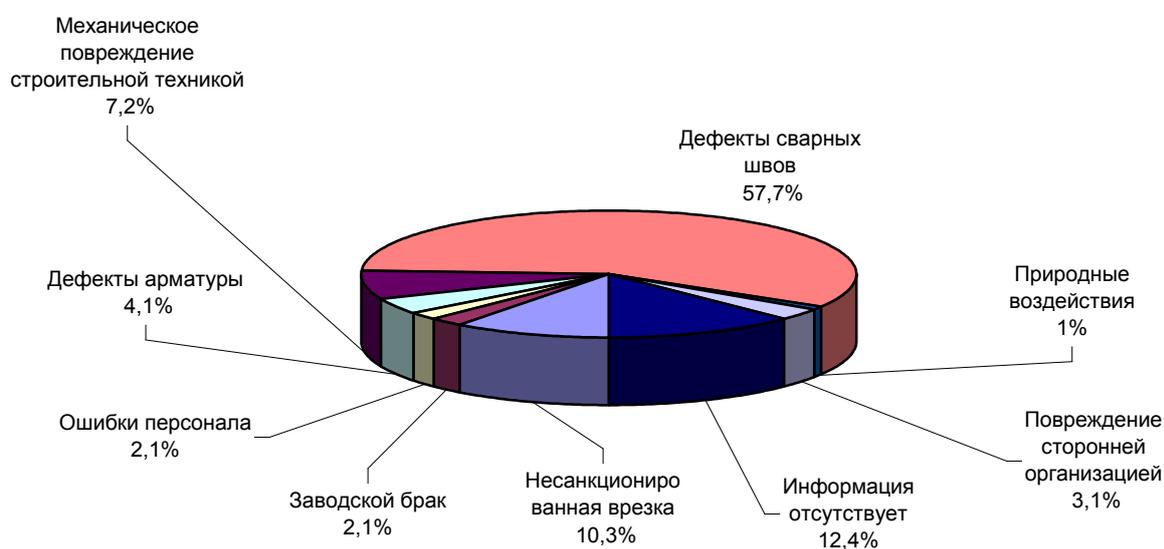
Причины, характеризующие произошедшие аварии, представлены на рисунке.

Наиболее значимым фактором происхождения аварий являются дефекты сварных швов (см. рисунок). В связи с этим увеличение надежности и безопасности всей системы магистрального трубопроводного транспорта нефти может быть осуществлено за счет повышения надежности сварных швов.

Участки сварного соединения непосредственно после сварки сильно различаются по структуре металла, уровню внутренних напряжений и, значит, по механическим (прочность, твердость, пластичность) свойствам. Происходит это вследствие того, что участки металла на небольшом расстоянии по обе стороны от стыка нагреваются до разной температуры (колебание составляет примерно 1500 °С). Термическими напряжения суммируются с усадочными, возникающими при кристаллизации расплавленного металла сварочной ванны. В результате внутренние сварочные напряжения достигают значительных величин, приводят к изменению размеров и формы свариваемого изделия, создают в околосварочной зоне участки (прослойки) с измененной структурой, повышенной прочностью и твердостью и пониженной пластично-

стью. Появление таких термомодеформированных участков создает предпосылки для зарождения и развития трещин, которые могут привести к разрушению. Кроме того, в металле сварных швов, как и в металле тела трубы, в процессе длительной эксплуатации происходит изменение структурного состояния, приводящее к изменению его физико-механических свойств. Изменение структурного состояния металла в ходе длительной эксплуатации связано с процессами деформационного и естественного старения, накопления дефектов в результате воздействия напряжений, коррозионной среды и водорода, малоцикловой усталости металла. Изменения физико-механических свойств стали в общем выглядят следующим образом [1]:

- повышаются предел текучести и предел прочности при растяжении;
- уменьшаются относительное удлинение и сужение;
- повышается твердость;
- снижается ударная вязкость;
- повышается температура перехода стали в хрупкое состояние.



Причины аварий на магистральном транспорте нефти Республики Беларусь

В настоящее время существует ряд методов, которые позволяют повысить надежность магистральных трубопроводов [2 – 4], основными из которых являются методы увеличения ресурса тела трубы.

Одним из таких методов является локальная термическая термообработка, которая позволяет восстановить структуру металла в сварном соединении и снизить остаточные напряжения, возникающие после сварки.

В настоящее время существует способ термической обработки сварных труб с применением индукционного нагрева, используемый на трубопрокатных заводах [2]. Способ обработки труб совмещает локальный и объемный нагревы индукторами в один технологический процесс – сварное соединение нагревают плоским индуктором до температуры аустенитного превращения металла шва, после охлаждения душем малой интенсивности до 200...150 °С, затем в цилиндрическом индукторе нагревают всю трубу до температуры аустенитного превращения основного металла, охлаждают интенсивным душем и подвергают высокому отпуску. Двойная фазовая перекристаллизация металла шва и околошовной зоны в сочетании с ускоренным, но не интенсивным, промежуточным охлаждением обеспечивает измельчение зерна и гомогенизацию структуры этой околошовной зоны, в результате чего существенно повышается ударная вязкость [2].

Другой способ обработки сварных соединений – пиротермическая обработка сварных соединений труб с помощью термохимической ленты [3]. Состав такой ленты – железная окалина, магниевый порошок и связующее вещество (синтетический каучук). Температура горения ленты до 2100 °С. В процессе горения термохимической ленты образуется пористый шлакообразный слой с высокой плотностью тепловыделения и температурой около 1100...1200 °С, который продолжает активно воздействовать на поверхность трубы в течение 10...25 минут обеспечивает низкую скорость охлаждения. В результате пиротермической обработки сварного соединения изменяется структура металла и снижается уровень остаточных напряжений. Варьируя температуру обработки, время нагрева и скорость охлаждения, можно добиться необходимого результата.

Указанные мероприятия (восстановительную термическую обработку) планируется проводить на основе оценки фактического уровня механических свойств металла трубопровода.

Особую остроту проблеме надежности и безопасности действующих потенциально опасных технологических объектов, в том числе магистральных трубопроводов, придает деградация механических свойств, связанная со старением металла.

Работы в области эффективной оценки текущего состояния металла и остаточного ресурса оборудования и конструкций активизировались в последнее время в первую очередь в научных учреждениях на всем постсоветском пространстве. Это связано с тем, что данные исследования направлены на создание условий надежной и безопасной работы оборудования и конструкций, которые уже эксплуатируются длительное время. Так, например, группой исследователей (ЦНИИПСК г. Москва) разработан способ диагностики металлоконструкций сосудов и аппаратов давления и определения их остаточного ресурса [5], основанный на определении скорости смещения температурной зависимости, характеристик трещиностойкости металла объектов. Данный метод хорошо зарекомендовал себя и имеет широкое применение, прежде всего для объектов нефтехимических предприятий. По данному направлению также активно ведутся и собственные исследования. С 2001 года ведутся работы по разработке основ оценки механических свойств материалов без вырезки образцов или с применением микровырезов в рамках выполнения ГПОФИ «Диагностика» тема «Разработка теоретических и технологических основ оценки механических свойств материалов малоразрушающим способом». В результате выполнения данной работы получены результаты, которые являются хорошим научным заданием в части использования при разработке методики оценки остаточного ресурса оборудования и конструкций, в том числе и для оценки необходимости восстановительной термической обработки (по уровню механических свойств). Так, разработан способ определения ударной вязкости стальных изделий [6], который позволяет без разрушения и вырезки образцов определять фактическую ударную вязкость металла в любой точке диагностируемой конструкции, в том числе в области сварных швов и зоне термического влияния, за счет математической обработки геометрических характеристик параметров отпечатка на материале после определения твердости по Виккерсу, в том числе и переносным твердомером.

Проведена апробация работоспособности методики определения механических свойств стали на деталях неразрушающим методом с использованием метода определения твердости. Основные эксперименты выполнены на ответственных деталях, использующихся для элементов нефтехимического оборудования: штоки компрессора, пружины предохранительных клапанов. На указанных деталях выполнено определение параметров отпечатка пирамидального индентора при определении твердости по методу Виккерса и косвенно определены основные механические свойства. Сравнение характеристик, полученных по разрабатываемой методике и определенных стандартным способом, показало удовлетворительную их корреляцию. Это говорит о возможности применения разработанной методики для определения фактического уровня механических свойств неразрушающим способом для различных ответственных деталей и металлоконструкций, в том числе и магистральных трубопроводов.

Оригинальность предлагаемых методов диагностики металлического объекта состоит в том, что оценку предполагается выполнять в первую очередь по скорости деградации всего комплекса основных механических свойств металла (предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и ударной вязкости). Текущее состояние материала планируется оценивать по комплексному параметру механических свойств  $B$ , включающему основные характеристики металла (предел прочности, относительное удлинение и ударную вязкость) [7, 8]:

$$B = \frac{n\sigma_s \delta_5}{KCU}, \text{ м}^{-1},$$

где  $\sigma_s$  – предел прочности, МПа;  $\delta_5$  – относительное удлинение, отн. ед.;  $KCU$  – ударная вязкость, МДж/м<sup>2</sup>;  $n$  – коэффициент заполнения диаграммы кратковременного растяжения, близкий к 0,9;  $B$  – параметр взаимосвязи указанных характеристик, м<sup>-1</sup>.

При этом текущие механические свойства материала характеризуются одной точкой на графике –  $B = f(KCU)$  – и определяются в первую очередь неразрушающим способом по геометрическим параметрам отпечатка после внедрения в материал пирамидального индентора.

На данном этапе ведутся работы по разработке метода, критериев выбора и оценки критических областей различных металлоконструкций, в том числе и магистральных трубопроводов, а также разрабатываются и апробируются конкретные технологические приемы косвенного определения механических свойств металла различных металлоконструкций.

В настоящее время планируется провести стандартные испытания на прочность и ударную вязкость образцов труб, эксплуатировавшихся длительное время на территории Беларуси, а также образцов, взятых из аварийного запаса с целью определения текущего состояния и разработки метода, который позволит повысить надежность системы трубопроводного транспорта и сократить затраты на ремонт. Собирается банк данных по фактическому состоянию, структуре и механическим свойствам металла магистральных трубопроводов, эксплуатируемых в Республике Беларусь длительное время.

#### **Заключение**

Полученные результаты планируется использовать прежде всего на предприятиях нефтехимической промышленности, а также объектах трубопроводного транспорта.

Потенциальная эффективность проводимых исследований состоит в широком внедрении методики неразрушающей оценки механических свойств металла, а также восстановительной термической обработки на предприятиях Республики Беларусь, что позволит повысить надежность и безопасность эксплуатации различных технических объектов.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Мясников В.А. Оценка параметров конструкционной надежности длительно эксплуатируемых трубопроводов Западной Сибири: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2004.
2. Зимин Н.В., Акимов И.К., Чельшев В.В. Термическая обработка сварных труб с применением индукционного нагрева // МиТОМ. – 1987. – № 8. – С. 23 – 26.
3. Структура сварного соединения труб после пиротермической обработки / С.В. Сериков, Р.Г. Ковалев, А.В. Сирота, В.И. Черный, Т.Я. Васильева // МиТОМ. – 1993. – № 2. – С. 13 – 14.
4. Бордовский А.М. Безопасные методы и прогрессивные технологии восстановления несущей способности линейной части нефтепроводов // Промышленная безопасность. – 2004. – № 9. – С. 37 – 40.
5. Пат. РФ №2032163 (19.02.93 г.). Способ диагностики металлоконструкций сосудов и аппаратов давления и определения их остаточного ресурса / В.К. Востров, В.М. Горицкий.
6. Заявка на патент РБ № а20050386 (2005.04.14). Способ определения ударной вязкости стальных изделий / А.С. Снарский, Ф.И. Пантелеенко, А.В. Крыленко.
7. Снарский А.С., Крыленко А.В. Дegrадация прочностных свойств металла промышленного оборудования и строительных конструкций // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2004. – № 6. – С. 93 – 98.
8. Снарский А.С., Крыленко А.В. Методы определения механических свойств металла оборудования и конструкций // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2002. – Т. 1. – № 2. – С. 57 – 62.