

некоторых из них видны круглые включения, являющиеся центрами зарождения пор (рис. 7,б–в). Путем энергодисперсионного элементного анализа выявлено, что сферические включения являются избыточной карбидной фазой Fe_3C .

Заключение

Полученные в данной работе результаты показывают возможность улучшения конструкционных свойств низколегированной стали путем комбинирования равноканального углового прессования и закалки. Показано, что РКУП, формируя УМЗ структуру, повышает прочность стали 09Г2С в 1,7 раз по сравнению с исходным состоянием, однако снижает пластические свойства и ударную вязкость. Установлено, что РКУП привело к смене основного механизма разрушения с вязкого ямочного в крупнозернистом состоянии на хрупкое разрушение квазисколом в УМЗ состоянии, а значит, несмотря на высокие прочностные характеристики материала после РКУП необходима последующая термообработка, позволяющая сохранить высокую прочность материала с одновременным повышением значений ударной вязкости. Показано, что закалка и кратковременный отпуск оказали заметное релаксирующее воздействие на структуру стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации методом РКУП, и повысили энергию разрушения более чем в 12 раз при комнатной температуре и почти в 20 раз при -60°C . Результаты проведенной работы могут быть использованы при разработке технологий упрочнения и повышения хладостойкости конструкционных сталей.

Литература

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Valiev R.Z., Langdon T.G. Developments in the use of ECAP processing for grain refinement // Reviews on Advanced Materials Science. – 2013. – № 1. – P. 15–26.
3. Cojocaru V. D., Răducanu D., Șerban N. et al. Microstructural observations of fracture surfaces for a 6063-t1 ECAP processed aluminum alloy // Sci. Bull. – 2010. – Series B. – Vol. 72, Iss. 3. – P. 163–172.
4. Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Известия АН СССР. Металлы. – 1981. – № 1. – С. 115–120.
5. Borisova M., Yakovleva S., Makharova S. Investigation of steel 09G2S processed by equal channel angular pressing // Adv. Mat. Research. – 2015. – Vol. 1127. – P. 61–65.
6. Захарова Г.Г., Астафурова Е.Г., Найденкин Е.В. и др. Механические свойства и характер разрушения феррито-перлитной стали 10Г2ФТ, подвергнутой равноканальному угловому прессованию и высокотемпературным отжигам // Материаловедение. – 2010. – № 11. – С. 57–64.
7. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Клевцова Н.А. Прочность и механизмы ударного разрушения наноструктурированных материалов // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 11. – С. 345–350.
8. Greger M., Vodarek V., Dobrzanski L.A. et al. The structure of austenitic steel AISI 316 after ECAP and low-cycle fatigue // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – Vol. 28, Iss. 2. – P. 151–158.
9. Lehrbacher C., Zinner S., Leitner H. Atome probe study of the carbon distribution in a hardened martensitic hot-work tool steel X38CrMoV5-1 // Micron. – 2012. – 43. – P. 818–826.

Поступила в редакцию 10.09.2015

УДК 622.691.4.004.14 (211), 620.171.2:620.186.4

Разрушения и повреждения объектов магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Арктики

А.М. Большаков, А.С. Сыромятникова

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

Приведены результаты исследования влияния длительной эксплуатации на структуру и механические свойств малоуглеродистой низколегированной стали трубы магистрального газопровода Республики Саха (Якутия). Показано, что протекающие на нанометровом масштабном уровне структурно-

БОЛЬШАКОВ Александр Михайлович – д.т.н., зав. отделом, a.m.bolshakov@iptpn.ysn.ru; СЫРОМЯТНИКОВА Айталипа Степановна – к.ф.-м.н., в.н.с., a.s.syromyatnikova@mail.ru.

деградационные процессы приводят к деградации структуры и свойств на микро- и макроуровнях. Рассмотрены разрушения и повреждения трубопроводов и оборудования газовой промышленности при их длительной эксплуатации в условиях Арктики и показана их взаимосвязь с деградацией физико-механического состояния металла конструкций. Анализ разрушений и повреждений объектов газовой промышленности при их длительной эксплуатации свидетельствует о необходимости принятия мер по развитию и внедрению новых методов неразрушающего контроля, учету изменения физико-механического состояния металла труб при длительной эксплуатации при разработке нормативных документов, регулирующих их строительство и эксплуатацию.

Ключевые слова: трубная сталь, магистральный газопровод, длительная эксплуатация, деградация свойств, разрушения и повреждения.

Destructions and Damages of Objects of the Main Gas Pipeline at Long Operation in Conditions of the Arctic

A.M. Bol'shakov, A.S. Syromyatnikova

Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

The results of a study of the influence of long operation on structure and mechanical properties of low-carbon and low-alloy steel of the pipe of the main gas pipeline in Republic of Sakha (Yakutia) are presented. It is shown that structurally degradation processes proceeding on nanometer scale level lead to degradation of structure and properties on micro- and macro-levels. Destructions and damages of pipelines and the equipment of the gas industry at their long operation in conditions of the Arctic are considered and their interrelation with degradation of a physical and mechanical condition of the constructions metal is shown. The analysis of destructions and damages of the objects testifies about the necessity of development and use of new methods of nondestructive control, and that it is necessary to take into account the change of a physical and mechanical condition of pipes metal at long operation when standard documents regulating their building and operation are worked out.

Key words: pipe steel, main gas pipeline, long operation, degradation of properties, destructions and damages.

Введение

Одной из важнейших научно-технических проблем современности становится проблема продления ресурса безопасной эксплуатации потенциально опасных высокорисковых объектов. К числу таких систем относятся магистральные газопроводы (МГ) из-за повышенного риска возникновения в них техногенных аварий, вызванных недостаточной эксплуатационной надежностью металла. Магистральные газопроводы Республики Саха (Якутия) являются уникальными металлоемкими конструкциями, которые проложены и эксплуатируются в зоне распространения вечномерзлых грунтов с 1970 г. Анализ возникновения аварийных ситуаций на магистральном газопроводе РС(Я) позволяет сделать вывод о том, что общее техническое состояние оборудования и газопроводов газопроводной системы ухудшается, их эксплуатационный ресурс практически исчерпан; при этом возрастает опасность отказов, обусловленных деградационными процессами в металле труб при их длительной эксплуатации [1–5].

В последнее десятилетие интенсивно проводятся экспериментальные работы, посвященные изучению механических свойств и структуры металла труб стареющих МГ [6–11]. Однако мнения исследователей относительно природы и роли процесса старения и его влияния на свойства трубных сталей не однозначны, а то и противоречивы.

Исследование характера изменений параметров сопротивления разрушению, а также структурного состояния и степени дефектности трубной стали 09Г2С после длительной (более 35 лет) эксплуатации в условиях Арктики показало следующее [11]. При длительной эксплуатации трубной стали протекают структурно-деградационные процессы: деформация и разрушение цементита в перлитных колониях, эволюция дислокационной субструктуры и образование карбидных выделений в объеме ферритных зерен. Эти процессы на микроуровне приводят к уменьшению содержания и изменению характера размерного и объемного распределения перлитных колоний, изменению микротвердости фазовых составляющих стали, на макроуровне – к дегра-

дации его механических свойств: снижению параметров сопротивления разрушению (ударной вязкости, работы зарождения трещины), к значительному понижению характеристик, отражающих сопротивление хрупкому разрушению – критической температуры хрупкости и отношения работы распространения трещины к работе ее зарождения в диапазоне климатических температур [11].

При этом стандартные механические свойства трубной стали: предел прочности, предел текучести, относительное удлинение и относительное сужение – остаются неизменными в рамках экспериментального разброса [11]. Это связано с протеканием при длительной эксплуатации структурно-деградационных процессов различной природы, конкурирующих во вкладе в прочностные свойства [11, 12].

Установление реального состояния металла труб магистрального газопровода после длительной эксплуатации в условиях вечномерзлых грунтов, изучение закономерностей изменений их физического состояния в процессе длительной эксплуатации при различных условиях, а также определение причин, обуславливающих разрушение и повреждения на МГ, является актуальной задачей прогнозирования эксплуатационной надежности стареющих стальных конструкций. В работе приведен анализ причин и сценария развития аварий на МГ РС(Я) от развития усталостных повреждений при длительной эксплуатации.

Краткое описание аварий

В статье приведен анализ причин двух аварий на одном участке МГ Якутии (2003 г.) и разрушения коренной задвижки фонтанной арматуры (2008 г.).

Первая авария представляла собой раскрытие металла вдоль трубопровода по верхней части с многочисленными ветвлениями трещины на месте монтажного кольцевого шва (рис. 1).

Вторая авария представляла собой разрыв кольцевого сварного шва с последующим выбросом труб от оси укладки с радиусом 30–50 м. Общая длина разрушения составила 22 м. Общий вид второго разрушения газопровода Берге-Якутск показан на рис. 2.

Разрушение задвижки фонтанной арматуры произошло в области перехода от корпуса задвижки к фланцевому соединению в месте стыковки внутренних стальных цилиндров, вид излома задвижки приведен на рис. 3.

Результаты и обсуждение

Разрушение трубы при первой аварии носило взрывной характер без возгорания, распространение трещин происходило механизмом отрыва, на местах остановки трещины переходящим на механизм сдвига с пластическими составляющими. Расчетное значение внутреннего давления

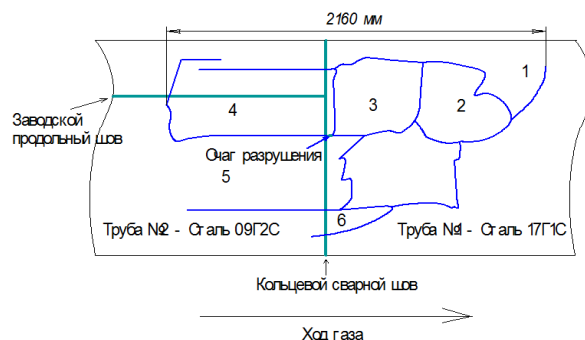


Рис. 1. Карта разрушения магистрального газопровода. Первая авария



Рис. 2. Общий вид разрушения магистрального газопровода. Вторая авария



Рис. 3. Строение излома задвижки фонтанной арматуры

в момент разрушения трубопровода составляло 4,54 МПа.

Материалы разрушившихся труб соответствовали маркам стали 17Г1С (труба №1) и 09Г2С (труба №2). Труба №2 эксплуатировалась с момента ввода газопровода (в течение 35 лет), а труба №1 была заменена и срок ее эксплуатации на момент аварии составлял 5 лет.

Исследование поверхности излома разрушения труб выявило, что очаг разрушения расположен с внутренней стороны трубы перпендикулярно кольцевому шву в зоне термического влияния на месте

соединения основного металла и сварного шва и имеет достаточную протяженность и долговременность роста трещины. Окисление поверхности излома разрушения свидетельствует о длительном развитии трещины. Общая протяженность разрушения трубы составляет 2160 мм.

Трещина имела остановку при переходе к основному металлу, затем начала продвижение в глубь основного материала, где наблюдаются радиальные рубцы, исходящие от этой зоны, впоследствии перешедшие в магистральную трещину, образовавшую излом с шевронным узором. Трещина более длительно и равномерно развивалась по основному металлу в направлении, перпендикулярном максимальным растягивающим (окружным) напряжениям, которая характеризуется усталостными бороздками, и остановилась в сварном шве, что свидетельствует о достаточной сопротивляемости распространению трещины сварного шва по сравнению с основным металлом.

Схема излома с усталостной трещиной длиной 30 мм и глубиной 3,5 мм с тремя характерными основными зонами показана на рис. 4. Очаг усталостного разрушения покрыт толстым слоем коррозии и отложений органических продуктов, вследствие чего невозможно определить тонкую структуру очага разрушения. Зона усталостного излома имеет протяженность 30 мм и глубину 3,5 мм, просматривается бороздчатая структура, также присутствуют продукты коррозии. Зона ускоренного развития трещины содержит участки хрупкого разрушения с ручьистым узором, что свидетельствует о внутризеренном разрушении, наблюдаются питтинги (язвы) на участках скола, покрыта более тонким слоем продуктов коррозии.

Результаты механических испытаний показали повышение прочностных и снижение пластических характеристик материала труб на 7–8% от нормативных требований, понижение характеристик ударной вязкости в околосшовной зоне до 50% и более по сравнению с основным металлом трубопровода, что объясняется протеканием деградиационных процессов в металле трубы при ее длительной эксплуатации.

Распространение трещины в трубах происходило по качественно различающимся траекториям: в трубе из более «старой» стали 17Г1С трещина распространялась с ветвлением, что привело к фрагментации трубы; в трубе из стали 09Г2С трещина распространялась прямолинейно без ветвления с дальнейшим отклонением от направления прямолинейного движения, начала двигаться по винтовой линии и закольцовалась.

При исследовании причин второй аварии было установлено, что значительных следов коррозии и

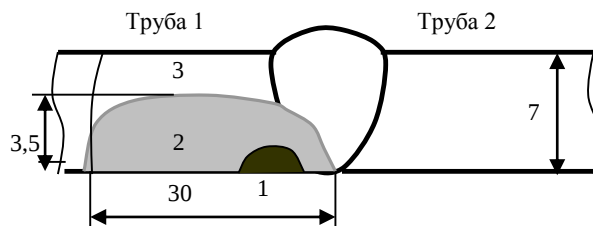


Рис. 4. Схема развития усталостной трещины: 1 – очаг возникновения трещины; 2 – зона усталостного распространения трещины; 3 – зона ускоренного развития трещины

утонения размеров стенки не наблюдается. Очагом разрушения послужила сквозная трещина – свищ, расположенная на нижней части трубопровода на месте соединения кольцевого сварного шва и заводского продольного шва. Свищ длиной 33 мм образовался от сварного дефекта – канальной поры размером 15х2 мм (рис. 5). Направление истечения газа было направлено в сторону грунта и в результате поднятия давления образовалась реактивная сила, послужившая началом разрыва кольцевого сварного шва с последующим выбросом труб. Материал разрушившихся труб соответствовал марке стали 09Г2С. Расчетное значение внутреннего давления в момент разрушения трубопровода составляло 4,26 МПа.

Эти исследования впервые показали на наличие протяженных усталостных трещин в металле магистрального газопровода, сформировавшихся в результате длительной эксплуатации в условиях РС(Я), а также деформационное старение металла магистрального газопровода, построенного более 30 лет назад.

По сценарию образования усталостных микротрещин при эксплуатации в течение 25 лет, которое привело к формированию и распространению хрупкой макротрещины, произошло и разрушение коренной задвижки фонтанной арматуры. Разрушение произошло по зоне термического влияния сварного шва в области перехода от корпуса задвижки к фланцевому соединению в месте стыковки внутренних стальных цилиндров с технологическим изменением толщины, создающим концентрацию напряжений с внутренней стороны.

В момент разрушения давление на устье арматуры составляло 10,5 МПа, а температура окру-



Рис 5. Излом очага разрушения магистрального газопровода. Вторая авария



Рис. 6. Схема излома задвижки

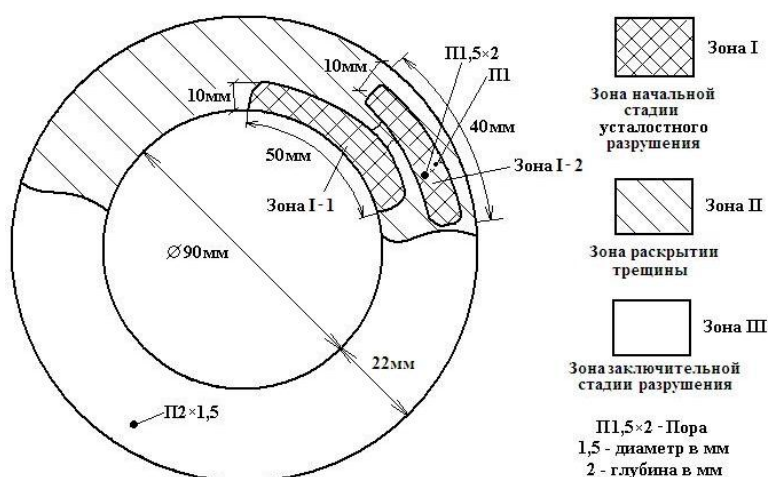


Рис. 7. Очаги усталостного разрушения на изломе задвижки

жающего воздуха равнялась -34°C . Схема излома приведена на рис. 6. Исследуемая поверхность излома полностью покрыта продуктами окисления, а часть поверхности – слоем нефтепродуктов, что свидетельствует о стадийности процесса разрушения детали. Корпус задвижки был изготовлен из стали 30ХГС и по механическим свойствам удовлетворял нормативным требованиям. Излом содержит два расположенных рядом очага разрушения, зону ускоренного развития трещины и зону долома.

Очаг разрушения, расположенный с внутренней стороны задвижки, состоит из слившихся многочисленных очагов усталостных микротрещин в виде характерных для малоциклового усталости «язычков» (указаны на рис. 7 стрелками). Усталостное разрушение развивалось под влиянием пульсирующего внутреннего давления. Раскрытие трещины и окончательное разрушение происходили по направлению от внутренней поверхности детали к внешней.

Анализ разрушения исследуемой детали показал следующее: под влиянием внутреннего давления в области стыковки внутренних цилиндров с технологическим изменением толщины, создающим концентрацию напряжений, зародились источники многоочагового малоциклового усталостного разрушения; распространение усталостных микротрещин вызвало объединение двух близко расположенных зон усталостного разрушения, что вызвало раскрытие трещины, затем произошло катастрофическое хрупкое разрушение детали по всему сечению.

Заключение

Анализ разрушений и повреждений объектов газовой промышленности РС(Я) при их длительной эксплуатации показывает на износ и образо-

вание сложно обнаруживаемых методами неразрушающего контроля дефектов в конструкциях после истечения нормативного срока эксплуатации и свидетельствует о необходимости принятия следующих мер: развитие и внедрение новых методов неразрушающего контроля оборудования и технических устройств, исчерпавших нормативный срок эксплуатации; ранжирование обнаруженных при диагностике дефектов в длительно эксплуатируемых конструкциях по степени риска возникновения катастрофического разрушения вследствие протекания деградиационных процессов в материале в процессе эксплуатации; разработка и принятие нормативных документов, регулирующих их строительство и эксплуатацию, с учетом изменения физико-механического состояния металла труб при длительной эксплуатации.

Литература

1. Большаков А.М., Голиков Н.И., Алексеев А.А. и др. Анализ аварий и отказов трубопроводов и оборудования нефтяной и газовой промышленности в условиях Севера. Часть 1. Разрушения и повреждения при длительной эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности // Газовая промышленность. – 2007. – №7. – С. 89–91.
2. Ермоленко Ю.Г., Большаков А.М., Черемкин М.К., Тури Р.Э. О техническом состоянии магистральных газопроводов Якутии // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – №10. – С. 5–7.
3. Слепцов О.И., Лыглаев А.В., Большаков А.М., Синцов С.А. Диагностика и безопасность стареющих больших механических систем, эксплуатирующихся в условиях Севера: Проблема и пути решения // Дефектоскопия. – 2008. – №6. – С. 31–41.
4. Большаков А.М., Татаринов Л.Н. Исследование динамики изменения надежности магистрального

газопровода после 30 лет эксплуатации в условиях Крайнего Севера // Газовая промышленность. – 2009. – №2. – С. 28–31.

5. Чухарева Н.В., Тихонова Т.В., Миронов С.А. Анализ причин аварийных ситуаций при эксплуатации магистральных трубопроводов в условиях Крайнего Севера в период с 2000 по 2010 г. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 3. – С. 231–243.

6. Филиппов Г.А., Ливанова О.В., Дмитриев В.Ф. Дegradaция свойств металла при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов // Сталь. – 2003. – № 2. – С. 84–87.

7. Лякишев Н.П., Кантор М.М., Воронин В.Н. и др. Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации // Металлы. – 2005. – № 1. – С. 3–16.

8. Махутов Н. А., Пермяков В.Н., Кравцова Ю.А., Ботвина Л.Р. Оценка состояния материала продуктопровода после его длительной эксплуатации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т.73, № 2. – С. 35–43.

9. Багмутов В.П., Столярчук А.С., Трудов А.Ф. и др. Комплексная оценка деградации трубной стали на различных структурных уровнях после длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – № 1. – С. 118–124.

10. Нохрин А.В., Чувильдеев В.Н. Старение сталей труб магистральных газопроводов // Вестник Нижегородского университета. – 2010. – № 5. – С. 171–180.

11. Сыромятникова А.С. Дegradaция физико-механического состояния металла труб магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях криолитозоны // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17, вып. 2. – С. 85–91.

12. Сыромятникова А.С. Расчетно-экспериментальная оценка прочностных свойств металла длительно эксплуатируемого газопровода // Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Т.2. 24–29 июня 2013 г. – Якутск: Ахсаан, 2013. – С. 49–53.

Поступила в редакцию 17.09.2015