

УДК 622.691.4.004.14 (211);

УДК 620.171.2:620.186.4

Деградация механических свойств и структурно-фазового состояния металла труб магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Севера

А.С. Сыромятникова*, А.М. Большаков**

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Россия

**Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия
a.m.bolshakov@iptpn.ysn.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования структуры и механических свойств малоуглеродистой низколегированной стали трубы после хранения в полевых условиях и длительной эксплуатации в составе магистрального газопровода Республики Саха (Якутия). Показано, что протекающие на нанометровом масштабном уровне структурно-деградационные процессы приводят к деградации структуры и свойств на микро- и макроуровнях. Показано, что метод АСМ при исследовании микроструктуры феррито-перлитной стали является единственным методом количественного определения шероховатости фазовых составляющих, характеристик границ зерен и регулярности структуры перлита, которые могут быть использованы для оценки степени поврежденности материала при длительной эксплуатации. Проведена оценка степени пластической деформации металла длительно эксплуатируемых труб магистрального газопровода, основанная на сравнительном анализе зависимости величины рекристаллизованных зерен металла до и после эксплуатации от степени предварительной пластической деформации. С применением предложенного способа проведена оценка остаточного ресурса металла магистрального газопровода после эксплуатации в условиях криолитозоны. Проведена расчетно-экспериментальная оценка прочностных свойств сталей, основанная на представлениях физики металлов и на экспериментальных данных структурных исследований. Проанализированы структурные факторы, влияющие на изменение прочностных свойств трубной стали при длительной эксплуатации.

Ключевые слова: трубная сталь, длительная эксплуатация, базовый эксперимент, деградация свойств, пластическая деформация, рекристаллизационный отжиг, размер зерна, прочностные свойства.

Degradation of mechanical properties and structurally-phase conditions of the main gas pipeline at long operation in the conditions of the North

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

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

**M.K.Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
a.m.bolshakov@iptpn.ysn.ru

Abstract. The results of a study of the structure and mechanical properties of low carbon and low alloyed steel of a pipe from a reserve stock and after long operation as a part of the Republics Sakha (Yakutia) main gas pipeline are presented. It is shown, that proceeding on nanometer scale level structurally degradation processes lead to degradation of structure and properties on micro-and macro-levels. It is shown, that AFM is a unique method of quantitative definition of a roughness of phase components, characteristics of borders of grains and structure regularities of pearlit of ferritic-pearlitic steels which can be used for estimation of

material degradation at long operation. A calculation-experimental method is proposed to predict the remaining life pipe steel. It is based on a comparative analysis of the dependence of the recrystallized grain size on the degree of preliminary plastic deformation before and after operation. This method is used to estimate the remaining life of gas main pipes having operated for a long time. The calculation and experimental estimation of the strength properties of steels based on representations of physical metallurgy and on experimental data of structural researches is performed. The influence of structural factors on the strength properties of pipeline steel at long operation was analysed.

Key words: pipe steel, long-term operation, base experiment, degradation of properties, plastic deformation, recrystallization annealing, grain size, strength properties.

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 года. 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- 3].

В последние десятилетия в России и странах СНГ интенсивно проводятся экспериментальные работы, посвященные изучению механических свойств и структуры металла труб стареющих МГ, однако, мнения исследователей относительно природы и роли процесса старения и его влияния на свойства трубных сталей неоднозначны, а то и противоречивы [4 - 7].

В 2008 году один из основателей науки о хладостойкости, доктор технических наук А.В. Лыглаев инициировал и научно обосновал необходимость проведения в Институте физико-технических проблем Севера СО РАН комплексных экспериментальных работ, направленных на исследование процесса накопления повреждений в металлоконструкциях, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур. Так были начаты исследования, названные инициатором “*Базовым экспериментом*”, цель которых состояла в изучении физической природы и установлении закономерностей деградации механических свойств и структурно-фазовых состояний металла при длительной эксплуатации в составе магистрального газопровода в условиях криолитозоны.

Материал и методика эксперимента

Объектами исследований являлись металл труб после длительной (около 30 лет) эксплуатации в составе действующего магистрального газопровода Мастах-Берге-Якутск и металл труб запаса. Химический анализ материала трубопроводов проводился на установке для спектрального анализа «Spectroport-F». Испытания на ударный изгиб образцов с U-образным надрезом проводились при комнатной и пониженной температурах на инструментированном маятниковом копре Roell Amsler RKP-450 согласно ГОСТ 9454-78, ISO 148-1. Микротвердость измерялась на приборе Leco Fr-3e при нагрузке 10 г на индентор в форме четырехгранной алмазной пирамидки. Измерение микротвердости проводилось отдельно для ферритной и перлитной составляющей структуры. Среднее значение определялось по результатам 50 измерений. Структурные исследования были проведены с использованием оптического микроскопа «Axio Observer Dlm», растрового электронного микроскопа JSM-6480LV, просвечивающего электронного микроскопа JEM-4000EX, атомно-силового микроскопа «IntegraSpectra».

Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что при длительной эксплуатации в условиях криолитозоны на нанометровом масштабном уровне протекают следующие 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 деградации 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 [8-10].

Наблюдающиеся изменения тонкой структуры стали: трансформация пластинчатой формы цементита, сопровождающаяся диффузией углерода в ферритной фазе, способствующей выделению избыточного углерода в виде дисперсных карбидов на дефектах кристаллического строения феррита, - могут происходить в условиях наводороживания трубного металла при длительной эксплуатации [7, 10]. Накоплению поврежденности способствуют как действующие растягивающие напряжения, так и водородсодержащая среда. Эксплуатируемый металл из-за появления дополнительных внутренних напряжений, и, как следствие, снижения сопротивления хрупкому разрушению, становится чувствительным к коррозионному и водородному растрескиванию.

Изменения физического состояния в процессе длительной эксплуатации могут протекать на различных структурных уровнях материала, поэтому важное значение при изучении их закономерностей приобретает проблема выбора методов исследования и установления характеризующих их качественных и количественных параметров.

Для исследования микроструктуры и топографических особенностей поверхности различных материалов в последнее время стал довольно широко применяться метод атомно-силовой микроскопии, который имеет высокое разрешение и чувствительность, позволяет получать изображения и данные о некоторых свойствах объекта в различных средах, получаемая информация может быть обработана статистически [11]. Однако работ в области металловедения, особенно фундаментального характера, с использованием АСМ пока немного. Поэтому в ходе выполнения Базового эксперимента была выполнена работа с целью изучения возможностей метода АСМ для исследования микроструктуры сталей феррито-перлитного класса, сформулированы требования к пробоподготовке и сделано заключение, что метод атомно-силовой микроскопии благодаря наличию трехмерной информации позволяет получить дополнительную к другим методам микроскопии числовые параметры, и при исследовании микроструктуры феррито-перлитной стали является единственным методом количественного определения шероховатости фазовых составляющих, характеристик границ зерен и регулярности структуры перлита, которые могут быть использованы для оценки степени поврежденности материала при длительной эксплуатации [12].

При изучении явления старения трубных сталей одной из ключевых проблем является то, что эмпирический подход, основанный на анализе экспериментальных данных об их стандартных механических свойствах, часто не дает достаточных оснований для доказательства наличия или отсутствия деградации свойств при длительной эксплуатации. Дело в том, что изменение стандартных механических свойств, связанное со старением, невелико, и на фоне 10% разброса исходных свойств эти характеристики остаются в рамках допустимых значений даже после весьма длительных сроков эксплуатации.

Для объяснения этого факта была проведена расчетно-экспериментальная оценка изменения прочностных свойств трубной стали при эксплуатации, основанная на результатах базового эксперимента, которая показала, что изменение стандартных механических свойств трубных сталей при длительной эксплуатации может происходить в широком интервале значений, что связано с протеканием при этом процессов различной природы, конкурирующих во вкладе в прочностные свойства [13]. Это объясняет различие мнений исследователей относительно того, влияет или нет длительная эксплуатация на стандартные механические свойства металлов [4 - 7].

При изучении закономерностей изменения структуры и деградации механических свойств материалов стареющих объектов первоочередной задачей является оценка уровня поврежденности материала по сравнению с исходным состоянием. Критерии оценки структурного состояния материала основаны либо на определении степени старения металла в зависимости от изменения механических свойств, либо по параметрам тонкой структуры трубного металла. Однако, указанные варианты выбора имеют свои ограничения, неучет которых может скрыть истинную картину структурной деградации металла. Из теории и практики термической обработки металлов известно, что структурным параметром, чувствительным к степени накопленной пластической деформации, является величина зерен металла после рекристаллизационного отжига. Было предложено использовать эту закономерность для оценки степени пластической деформации металла длительно эксплуатируемых труб, а также его остаточного ресурса (рис.) [14].

Если построить диаграмму рекристаллизации для исследуемого металла при возможных значениях накопленной металлом трубы степенях пластической деформации, появляется возможность оценить уровень поврежденности струк-

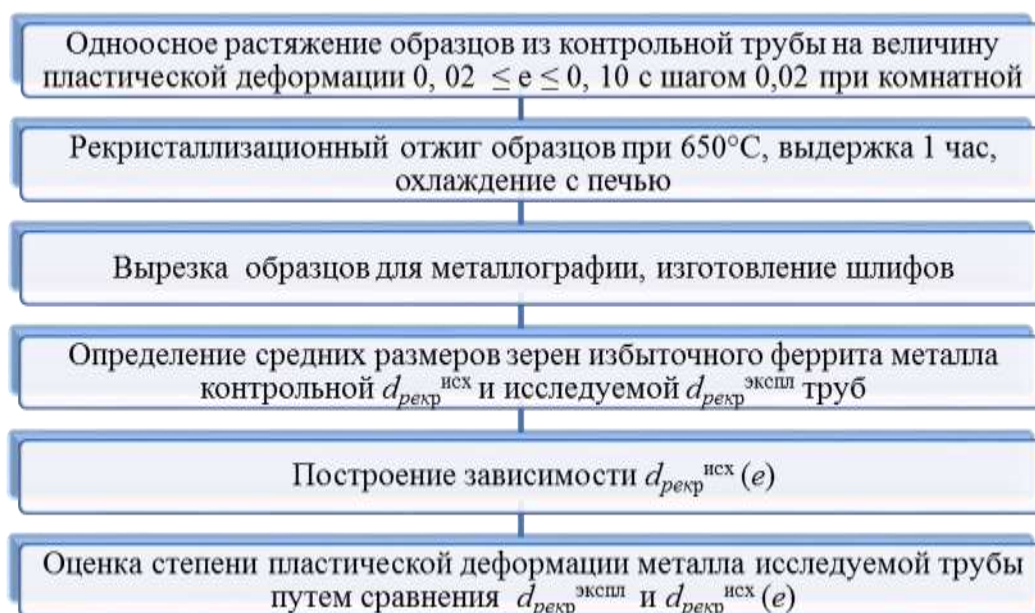


Рис. Алгоритм способа оценки степени пластической деформации металла длительно эксплуатируемых труб магистрального газопровода

туры металла в результате длительной эксплуатации (степень старения) и его остаточный ресурс путем проведения рекристаллизационного отжига стали в тех же условиях (температуре и времени нагрева), при которых получена диаграмма. В качестве интегральной характеристики уровня поврежденности в результате длительной эксплуатации (степени старения) следует принять степень пластической деформации металла при эксплуатации, а структурного параметра - величину зерна рекристаллизованного металла $d_{рекр}$.

Выполнение научно-исследовательских работ в рамках Базового эксперимента сопровождалось образовательной деятельностью. К исследованиям привлекались студенты Северо-Восточного федерального университета с целью развития их профессиональных компетенций, связанных с решением проблем в области изучения физических свойств и состояния конденсированных веществ, применяемых в условиях Арктики, а также адаптации к особенностям и существующей научной инфраструктуре Северо-восточного региона России. Так, под руководством автора статьи были выполнены и успешно защищены выпускные квалификационные работы студентов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 – Физика, профиль “Физика конденсированного состояния вещества”: «Влияние длительной эксплуатации в условиях низких климатических температур на механические свойства стали ВСтЗсп» (Трифонов Н. В., гр. Ф-04-1, 2009 г.), «Влияние рекристаллизационного отжига на структуру и

свойства металла магистрального газопровода» (Иванова Л. Н., гр. Ф-06-1, 2011 г.), «Исследование структуры и свойств стали 09Г2С после длительной эксплуатации в условиях РС(Я)» (Никонова Ю. С., гр. Ф-06-2, 2011 г.), «Влияние технологии изготовления и длительной эксплуатации на прочностные свойства трубной стали 09Г2С» (Новикова Н. С., гр. Ф-06-2, 2012 г.), «Применение метода атомно-силовой микроскопии для исследования феррито-перлитных сталей» (Неймохова Н. С., гр. Ф-08-2, 2013 г.), «Оценка степени пластической деформации и остаточного ресурса металла длительно эксплуатируемых труб магистрального газопровода» (Афанасьева М. А., гр. Ф-10-1, 2015 г.), а также защищена магистерская диссертация по направлению подготовки 020100.68 - Химическое материаловедение на тему “Исследование влияния длительной эксплуатации на физико-механическое состояние металла труб магистрального газопровода в условиях криолитоэнозны” (Гуляева Е. М., гр. В-М-Х-13, 2015 г.).

Заключение

В ходе выполнения исследований в рамках Базового эксперимента получены следующие результаты:

При длительной эксплуатации в составе магистрального газопровода Республики Саха (Якутия) в металле трубы в результате действия растягивающих напряжений и наводороживания металла происходят изменения тонкой структуры стали: трансформация пластинчатой формы цементита, выделение избыточного углерода

в виде дисперсных карбидов на дефектах кристаллического строения феррита. Эксплуатируемый металл из-за появления дополнительных внутренних напряжений, и, как следствие, снижения сопротивления хрупкому разрушению, становится чувствительным к коррозионному и водородному растрескиванию.

Показано, что числовые характеристики микроструктуры феррито-перлитных сталей, определяемых методом АСМ дополнительно к данным других методов микроскопии, могут быть использованы для оценки степени поврежденности материала при длительной эксплуатации.

Проведена расчетно-экспериментальная оценка прочностных свойств сталей, основанная на представлениях физики металлов и на экспериментальных данных структурных исследований. Проанализированы структурные факторы, влияющие на изменение прочностных свойств трубной стали при длительной эксплуатации. Показано, что значения стандартных механических свойств трубных сталей при длительной эксплуатации могут варьировать в достаточно широком интервале значений, что связано с протеканием при этом процессов различной природы, конкурирующих во вкладе в прочностные свойства.

Разработан способ оценки степени пластической деформации трубного металла, основанный на сравнительном анализе зависимости величины рекристаллизованных зерен металла до и после эксплуатации от степени предварительной пластической деформации. С применением предложенного способа проведена оценка остаточного ресурса металла магистрального газопровода.

Литература

1. Махутов Н.А., Лыглаев А.В., Большаков А.М. Хладостойкость (метод инженерной оценки). – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2011. – 195 с.
2. Большаков А.М., Сыромятникова А.С. Разрушения и повреждения объектов магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Арктики// Наука и образование. 2015. № 4 (80). С. 94–99.
3. 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.г.// Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 3. С. 231–243.
4. Гумеров А.Г., Зайнуллин Р.С., Ямалеев К.М., Росляков А. В. Старение труб нефтепроводов. – М.: Недра, 1995. – 218 с.
5. Филиппов Г.А., Ливанова О.В., Дмитриев В.Ф. Дegradaция свойств металла при длитель-

ной эксплуатации магистральных трубопроводов//Сталь. 2003. №2. С.84–87.

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

7. Счастливец В.М., Табатчикова Т.И., Терещенко Н.А., Яковлева И.Л. Дegradaция структуры трубной стали при длительной эксплуатации в контакте с сероводородосодержащей средой// Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 111. № 3. С. 290–303.

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

9. Панин В.Е., Деревягина Л.С., Лебедев М.П., Сыромятникова А.С., Сурикова Н.С., Почивалов Ю.И., Овечкин Б.Б. Научные основы хладноломкости конструкционных сталей с кристаллической решеткой и дegradaции их структуры при эксплуатации в условиях отрицательных температур// Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. N 2. С. 5–14.

10. Сыромятникова А.С. Эксплуатационная дegradaция металла труб магистральных газопроводов Севера / А.С. Сыромятникова; отв. ред. М.П. Лебедев; Ин-т физ.-техн. проблем Севера СО РАН, Сев.-Вост. федер. ун-т. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2017. – 97 с.

11. Зуев Л. Б., Шляхова Г. В. О возможностях атомно-силовой микроскопии в металлографии углеродистых сталей// Материаловедение. 2014. N 7. С. 7–12.

12. Сыромятникова А.С., Гуляева Е.М., Попов В.И. Применение атомно-силовой микроскопии для исследования микроструктуры феррито-перлитных сталей// Вопросы материаловедения. 2014. N 1(77). С. 29–34.

13. Syromyatnikova, A.S., Gulyaeva, E.M. & Alekseeva, K.I. Computational-Experimental Estimation of Strength Properties of the Metal of Long-Operating Gas Pipeline// Metal Science and Heat Treatment. 2016. Vol. 58. No 7-8. pp. 61–65.

14. Syromyatnikova, A.S., Gulyaeva, E.M. & Alekseeva, K.I. Estimation of the Degree of Plastic Deformation and the Remaining Life of Gas Main Pipes Having Operated for a Long Time// Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2016. No. 10. pp. 1006–1008.

References

1. Makhutov N.A., Lyglaev A.V., Bol'shakov A.M. Cold resistance (The method of engineering estimation). – Novosibirsk: SB RAN Publishing house, 2011. – P. 195.

2. *Bol'shakov A.M., Syromyatnikova A.S.* Destructures and damages of objects of the main gas pipeline at long operation in condition of the Arctic//Nauka i obrazovanie. 2015. № 4 (80). С. 94-99.
3. *Chuhareva N.V., Mironov S.A., Tikhonova T.V.* Analysis of the causes accidents during operation of the main pipelines in the Far North from 2000 to 2010// The electronic scientific journal Oil and Gas Business. 2011. № 3. С. 231-243.
4. *Gumerov A.G., Zainullin R.S., Yamaleev K.M., Roslyakov A.V.* The ageing of oil pipe lines. – М.: Nedra, 1995. – P. 218.
5. *Filippov G.A., Livanova O.V., Dmitriev V.F.* Degradation of the properties of metal in long-term pipeline operation//Steel in Translation. 2003. V. 33. № 2. PP. 60-64.
6. *Nokhrin A.V., Chuvil'deev V.N.* Pipe steel ageing of gas-main pipelines// Vestnik Nigegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. 2010. № 5. С.171-180.
7. *Schastlivtsev V.M., Tabathikova T.I., Tereshchenko N.A., Yakovleva I.L.* Degradation of the pipe-steel structure upon long-term degradation of the pipe-steel structure upon long-term operation in contact with a hydrogen sulfide-containing //The physics of metals and metallography. 2011. V. 111. № 3. PP. 290-303.
8. *Syromyatnikova A.S.* Degradation of physical and mechanical condition of the gas main pipeline metal at long operation in the conditions of the //Physical mesomechanics. 2014. V. 17. N 2. PP. 85-91.
9. *Panin V.E., Derevyagina L.S., Lebedev M.P., Syromyatnikova A.S., Surikova N.S., Pochivalov Yu.I., Vouching B.B.* Scientific basis for cold shortness of structural bcc steels and their structural degradation at below zero temperatures //Physical mesomechanics. 2016. V. 19. N 2. PP. 5 - 14.
10. *Syromyatnikova A.S.* The The operation degradation of North gas main pipeline metal. - Novosibirsk: SB RAN Publishing house, 2017. – P. 97.
11. *Zuev L.B., Schlyahova G.V.* About possibilities of atomic-force microscopy in the metallography of the carbonaceous steels// Materialovedenie. 2014. N 7. PP. 7 -
12. *Syromyatnikova A.S., Gulyaeva E.M., Popov V.I.* Application of atomic-force microscopy for microstructure researches of ferritic-pearlitic steels // Voprosy materialovedeniya. 2014. N 1(77). PP. 29-34.
13. *Syromyatnikova, A.S., Gulyaeva, E.M. & Alekseeva, K.I.* Computational-Experimental Estimation of Strength Properties of the Metal of Long-Operating Gas Pipeline// Metal Science and Heat Treatment. 2016. Vol. 58. No 7-8. pp. 61-65.
14. *Syromyatnikova, A.S., Gulyaeva, E.M. & Alekseeva, K.I.* Estimation of the Degree of Plastic Deformation and the Remaining Life of Gas Main Pipes Having Operated for a Long Time// Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2016. No. 10. pp. 1006–1008.

Поступила в редакцию 12.03.2018