

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-6-64-68>

МОНИТОРИНГ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МАТЕРИАЛА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА, ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕГОСЯ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

© Александр Михайлович Большаков, Афанасий Васильевич
Бурнашев*, Василий Моисеевич Ефимов

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Россия, 677890, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1; *e-mail: a.v.burnachev@mail.ru

*Статья поступила 7 декабря 2018 г. Поступила после доработки 26 декабря 2018 г.
Принята к публикации 11 марта 2019 г.*

Статья посвящена проблемам обеспечения надежности и безопасной эксплуатации длительно эксплуатирующихся опасных промышленных объектов, в частности, магистральных газопроводов, после 50 лет эксплуатации. Цель — разработка способа оценки охрупчивания металла длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов с использованием неразрушающего метода. Для решения данной задачи проведены экспериментальные исследования образцов из труб магистрального газопровода, на основании которых выбраны параметры, чувствительные к процессам структурной деградации. Обоснована применимость данных параметров для оценки степени деградации. Обобщая результаты механических и акустических исследований, установлена достаточно устойчивая корреляционная связь между определяемыми характеристиками. На основании этой корреляционной зависимости разработан способ оценки ударной вязкости. Экспериментальным путем получены предельные значения исследованных параметров, при которых эксплуатация конструкции становится опасной. Разработана блок-схема мониторинга изменения ударной вязкости стали магистрального газопровода при длительной эксплуатации. Экспериментальные результаты и разработанный метод оценки предельного состояния материала магистрального газопровода применены для технического диагностирования непроектных участков магистрального газопровода Мастах – Берге – Якутск, в результате которого оценены реальные эксплуатационные характеристики и собрана база данных исследуемых показателей для их дальнейшего мониторинга. Предлагаемый способ позволит повысить оперативность сбора информации о конструктивной надежности, оценить в процессе технического диагностирования степень деградации металла трубы без проведения механических испытаний и изготовления образцов, снизить материальные затраты на проведение планово-предупредительных ремонтов трубопроводов.

Ключевые слова: ударная вязкость; деградация металла; скорость звука; предельное состояние; длительная эксплуатация; магистральный газопровод.

MONITORING OF THE TOUGHNESS OF THE MATERIAL OF THE MAIN GAS PIPELINE AFTER LONG TERM OPERATION IN ARCTIC CONDITIONS

© Aleksandr M. Bol'shakov, Afanasy V. Burnashev*, Vasily M. Efimov

Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, ul. Oktyabr'skaya, Yakutsk, 677890, Russia; *e-mail: a.v.burnachev@mail.ru

Received December 7, 2018. Revised December 26, 2018. Accepted March 11, 2019.

The problems of ensuring the reliability and safe operation of long-running hazardous industrial facilities, in particular gas pipelines, after 50 years of operation are considered. The goal of the work is developing a method for assessing metal embrittlement of long-running main gas pipelines (MG) using a non-destructive method for monitoring and improving operational reliability. Experimental studies of the samples of the pipes of the main gas pipelines revealed the parameters most sensitive to the processes of structural degradation. The applicability of those parameters to assessing the degree of degradation is substantiated. Analysis of the results of mechanical and acoustic studies revealed correlation with an essentially large value of the correlation coefficient. Based on this correlation, a method for assessing the toughness has been developed. The experimentally obtained limit values of the studied characteristics at which the operation of the structure becomes dangerous are presented. A flowchart has been developed for monitoring changes in the toughness of the gas pipeline steel after long-term operation. The experimental results and developed method for estimating the limiting state of the gas pipeline material were used during technical

diagnostics of non-project sections of the Mastach — Berge — Yakutsk gas pipeline to determine real operational characteristics and form a database of the studied indicators for their further monitoring. The proposed method will improve the efficiency of accumulated information on the structural reliability and provide the possibility of assessing the degree of pipe metal degradation without conducting mechanical tests and making samples in the process of technical diagnostics thus reducing the material costs for conducting scheduled maintenance of the pipelines.

Keywords: impact toughness; metal degradation; sound velocity; limiting state; long-term operation; gas pipeline.

Введение

На территории Якутии с 70-х годов эксплуатируется магистральный газопровод Таас-Тумус – Берге – Якутск, обеспечивающий г. Якутск и близлежащие районы природным газом. Данный газопровод является уникальной металлоконструкцией, поскольку проложен и эксплуатируется в сложных геологических условиях — в районах распространения многолетнемерзлых грунтов и при больших температурных перепадах. Газопровод в таких условиях подвергается воздействию дополнительных непроектных нагрузок [1], которые носят периодический характер и проявляются в основном в зимний отрезок времени. Под влиянием перечисленных факторов и длительного срока эксплуатации газопровод в данное время считается практически исчерпавшим свой ресурс.

С каждым годом потребление газа увеличивается, что требует работы трубопровода на максимально возможном давлении, и эксплуатация газопровода с исчерпанным ресурсом при таком давлении представляет большую опасность — возникает угроза возникновения хрупких разрушений из-за структурной деградации металла трубы, снижающей сопротивление распространению трещин. В таких ситуациях, кроме расчетов по оценке остаточного ресурса, необходимы периодический мониторинг и сбор информации о реальном состоянии объекта с использованием методов, чувствительных к структурным изменениям. Несмотря на достаточную изученность проблемы оценки надежности, ресурса и деградации материала [2 – 8] длительно эксплуатируемых конструкций, актуальность данной темы занимает одно из первых мест среди задач по обеспечению техногенной безопасности.

Цель данной работы — разработка способа оценки охрупчивания металла длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов с использованием неразрушающего метода для мониторинга и повышения эксплуатационной надежности.

Материалы и методика эксперимента

Для выполнения поставленной цели были проведены испытания на ударный изгиб образ-

цов из сталей магистрального газопровода и ультразвуковые исследования. Во всех экспериментах использовали образцы из труб 530×9 мм одного производителя и одного типа прокатки. Эти трубы изготавливали из нормализованной трубной стали 09Г2С (по данным сертификата) в 1964 г. по техническим условиям ВТУ ЧМТУ-УКРНТИ 537-64 на Ждановском металлургическом заводе им. Ильича. Сталь исследовали в следующих состояниях: 1) аварийный запас (хранившийся в условиях консервации более 50 лет); 2) после эксплуатации 50 лет; 3) после эксплуатации 50 лет с дополнительным термомодеформационным старением (деформация 6 %, последующий отжиг при 650°C , охлаждение с печью). Термомодеформационное старение проводили в целях имитации достижения материалом его предельного состояния. За предельное состояние [9] принимается значение ударной вязкости, которое меньше или равно нормативной величине, указанной в технических условиях по изготовлению труб для магистральных газопроводов, а также в строительных нормах и правилах. Это состояние также подтверждается результатами визуального осмотра поверхности разрушения, когда в образце обнаруживается 100 %-ный кристаллический излом.

Скорость звука измеряли с помощью прибора ИСАВ-1 производства Ижевского государственного технического университета. Данный прибор позволяет измерять скорости поверхностных волн с погрешностью до 0,01 %. Датчики раздельного типа, излучатель и приемник закреплены в одну базу с постоянным расстоянием 70,3 мм, частота ультразвука $\sim 2,5$ МГц. Подробные характеристики и принцип работы прибора изложены в [10]. Измерения проводили на сегментах труб размерами $200 \times 250 \times 9$ мм (вдоль образующей трубы), шероховатость поверхности $Rz \leq 20$.

После ультразвуковых исследований из этих же сегментов были изготовлены образцы для испытаний на ударный изгиб, которые проводили при 20°C .

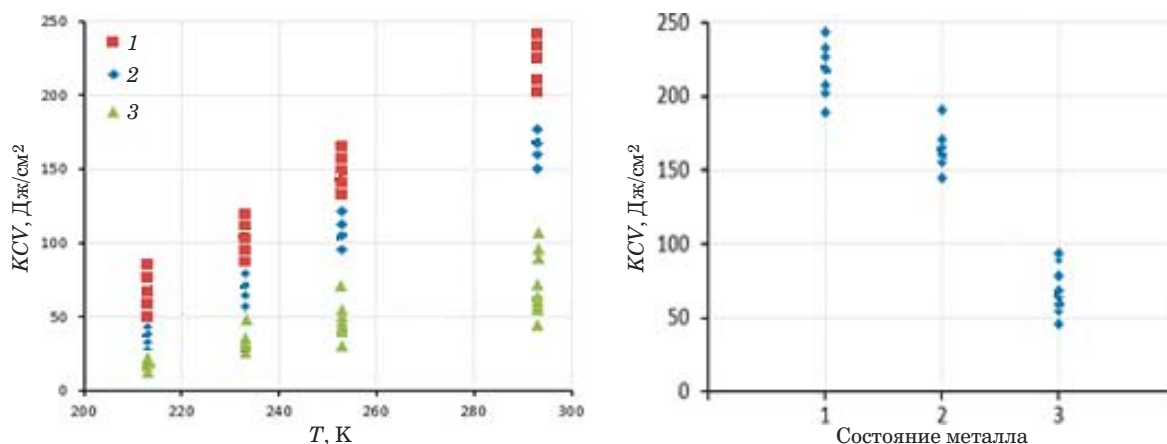


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости от температуры (а) и различных состояний металла (б): 1 — металл трубы из аварийного запаса; 2 — после эксплуатации 50 лет; 3 — после 50 лет эксплуатации и дополнительного термомеханического старения

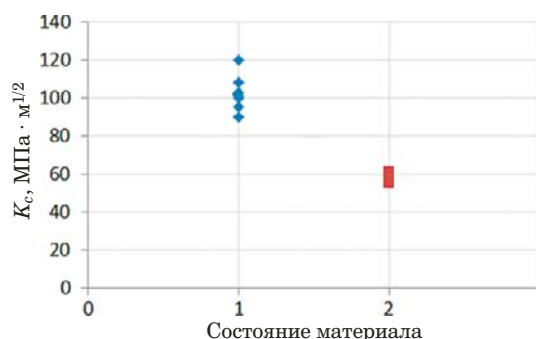


Рис. 2. Трещиностойкость материала трубы МГ: 1 — исходное состояние; 2 — после эксплуатации 50 лет

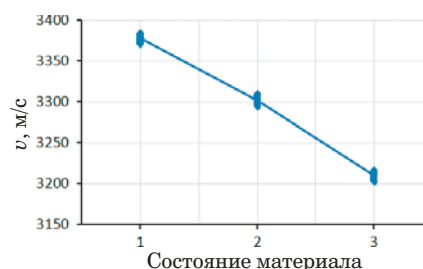


Рис. 3. Скорость распространения звука в стали МГ после различных состояний: 1 — металл трубы из аварийного запаса; 2 — после эксплуатации 50 лет; 3 — после 50 лет эксплуатации и дополнительного термомеханического старения

Основные результаты и выводы

На рис. 1 приведены зависимость ударной вязкости KCV образцов в различных состояниях от температуры испытаний (а) и график, построенный для случая испытаний при комнатной температуре (б). Видно, что по сравнению с KCV аварийного запаса ударная вязкость падает после эксплуатации до 25 % и после дополнительного старения более чем до 65 %. Наблюдается большая чувствительность KCV к изменению температуры и процессам старения по сравнению с результатами испытаний на образцах KCU [11, 12].

Как и ударная вязкость, трещиностойкость является одной из важных характеристик для оценки влияния времени эксплуатации и связанного с ним изменения механических характеристик металла. Для определения характеристик трещиностойкости использовали прямоугольные компактные образцы с краевой трещиной для испытаний на внецентренное растяжение по ГОСТ 25.506–85. Испытания проводились при температуре +20 °С.

Для оценки степени охрупчивания при длительной эксплуатации и деформационного старения были проведены сравнения значений трещиностойкости материала трубы до и после эксплуатации (рис. 2). За значение K_c в исходном состоянии материала магистральных газопроводов принимали результаты, полученные А. В. Лыглаевым и А. И. Левиным в Институте физико-технических проблем Севера СО РАН на той же марке стали, которую использовали после 5 и 10 лет эксплуатации [13].

Как и в случае с ударной вязкостью, наблюдалось существенное снижение сопротивления материала хрупкому разрушению.

Ультразвуковое исследование также показало снижение скорости звука с изменением состояний трубной стали (рис. 3). Можно отметить качественное сходство результатов испытаний на ударный изгиб и ультразвуковых измерений, что, естественно, связано с чувствительностью этих характеристик к изменениям структуры материала в процессе длительной эксплуатации.

Совмещая экспериментальные результаты ударных и ультразвуковых исследований, построили корреляционную зависимость $KCV(v)$

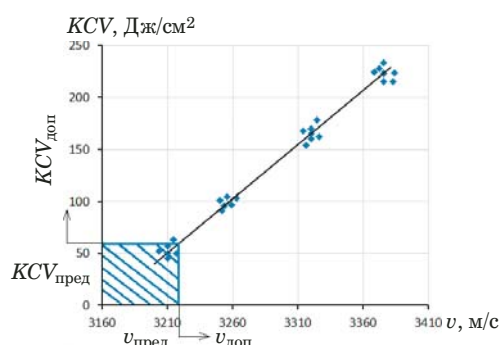


Рис. 4. Корреляционная зависимость ударной вязкости и скорости звука (заштрихована область предельных значений)

(рис. 4). Областям высоких ударной вязкости и скорости звука соответствуют значения, полученные на трубе аварийного запаса, которая имеет равновесную структуру. Областям с низкими значениями исследуемых величин (заштрихованная область) — результаты исследования образцов труб после эксплуатации и дополнительного искусственного старения. Разброс значений данных величин, вероятно, вызван анизотропией структуры материала.

Как видно из (рис. 4), имеет место не только совпадение максимумов, но и достаточно хорошая корреляция кривых. Подобие кривых сводится к линейным зависимостям $KCV(v)$. Корреляционные уравнения, полученные методом наименьших квадратов, для случая поверхностной волны имеют вид

$$KCV = 1,12v - 3385,$$

коэффициент корреляции 0,97.

На основе полученной корреляционной зависимости разработана схема мониторинга изменения ударной вязкости сталей магистрального газопровода при длительной эксплуатации (рис. 5). Периодический мониторинг позволяет оценивать реальное физическое состояние объекта, а также прогнозировать остаточный ресурс и скорость течения процессов старения материала.

В местах наибольших напряжений измеряли скорость звука по четырем секторам и заносили в протокол измерений. Используя корреляционную зависимость, оценивали ударную вязкость материала в данный момент времени. При следующей диагностике повторно фиксировали значения скоростей в этих же точках и, сравнивая с первоначальными значениями, судили о состоянии материала трубы.

Данная методика апробирована при проведении технического состояния магистрального газопровода в рамках НИР, получены значения исследуемых параметров и создана база данных для их дальнейшего мониторинга. К недостаткам

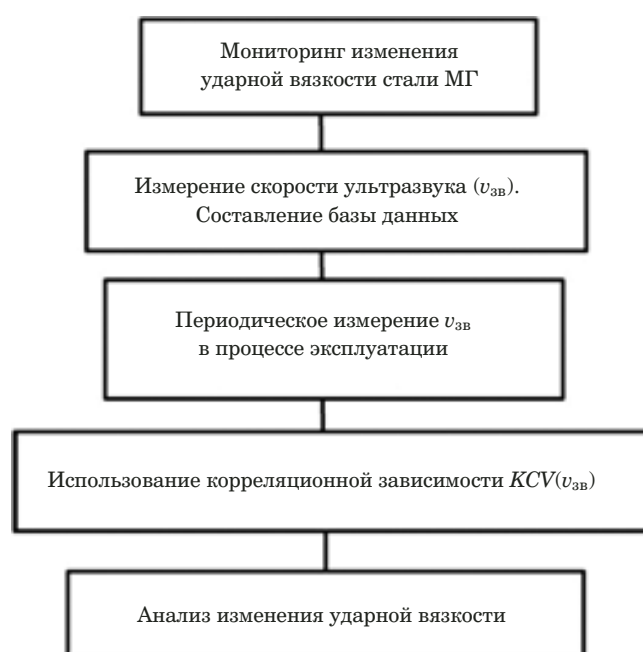


Рис. 5. Схема мониторинга ударной вязкости

данных исследований можно отнести тот факт, что исследования проводили только на одной марке стали, что сужает область применения предлагаемого способа. Выбор материала для проведения исследований скорости звука имеет одно из важнейших значений, от которого зависит достоверность результатов измерений. Большую роль играет вид прокатки сталей. До 1970-х годов при строительстве магистральных газопроводов использовали горячекатаные и нормализованные стали. Из-за анизотропии свойств стали разного вида проката, влияния внутренних микронапряжений распространение звуковых волн и их поглощение зернами, межзеренными границами будут иметь существенные отличия, которые создают трудности в обнаружении различных эффектов.

В случае конкретного магистрального газопровода такой проблемы не возникает из-за известных данных о трубе газопровода, полученных в результате заранее проведенных камеральных работ. Для широкого применения предложенного способа в арсенале исследователя должны быть корреляционные зависимости исследуемых параметров для марки стали трубы диагностируемого объекта.

Предлагаемый способ позволит повысить оперативность сбора информации о конструктивной надежности, оценить в процессе технического диагностирования степень деградации металла трубы без проведения механических испытаний и изготовления образцов, снизить материальные затраты на проведение планово-предупредительных ремонтов трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков А. М., Сыромятникова А. С., Алексеев А. А., Иванов А. Р. Непроектные положения газопроводов, проложенных подземным способом в районах многолетнемерзлых грунтов / Газовая промышленность. 2014. № 4(705). С. 66 – 69.
2. Сыромятникова А. С. Эксплуатационная деградация металла труб магистральных газопроводов Севера / Отв. ред. М. П. Лебедев. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. — 97 с.
3. Сыромятникова А. С., Алексеев А. А., Левин А. И., Лыглаев А. В., Большаков А. М. Механизмы разрушения полимерного материала при распространении и ветвлении трещин / Деформация и разрушение материалов. 2008. № 2. С. 33 – 39.
4. Лисин Ю. В., Махутов Н. А., Неганов Д. А., Студенов Е. П., Скородумов С. В. Комплексные механические испытания для расчетов прочности магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 4. С. 47 – 59.
5. Нечаев Ю. С. Новые подходы, результаты и методы для решения актуальных проблем старения, водородного охрупчивания и стресс-коррозионного поражения сталей (аналитический обзор) / Материаловедение. 2009. № 3. С. 50 – 63.
6. Чувильдеев В. Н. Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов. — Н. Новгород: Университетская книга, 2006. С. 18 – 67.
7. Филиппов Г. А., Ливанова О. В., Дмитриев В. Ф. Деградация свойств металла при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов / Сталь. 2003. № 2. С. 84 – 87.
8. Большаков А. М., Бурнашев А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния участка магистрального газопровода с изгибом / Безопасность труда в промышленности. 2015. № 10. С. 40 – 42.
9. Лыглаев А. В., Большаков А. М., Иванов А. Р. Оценка предельного состояния металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 7. С. 44 – 47.
10. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. — Новосибирск: Наука, 1996. — 183 с.
11. Большаков А. М., Бурнашев А. В. Исследование ударной вязкости стали магистрального газопровода после длительной эксплуатации в условиях Крайнего Севера / Деформация и разрушение материалов. 2018. № 8. С. 43 – 45.
12. Гладштейн Л. И., Ларионова Н. П., Милюевский Р. А. О переходе к оценке хладостойкости стали по результатам испытания образцов с острым треугольным надрезом / Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 2. С. 26 – 28.
13. Махутов Н. А., Лыглаев А. В., Большаков А. М. Хладостойкость (Метод инженерной оценки). — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — 195 с.

REFERENCES

1. Bol'shakov A. M., Syromyatnikova A. S., Alekseev A. A., Ivanov A. R. Non-design provisions of gas pipelines laid underground by the permafrost areas / Gaz. Promyshl. 2014. N 4(705). P. 66 – 69 [in Russian].
2. Syromyatnikova A. S. Operational degradation of metal pipes of the North gas main pipelines. — Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2017. — 97 p. [in Russian].
3. Syromyatnikova A. S., Alekseev A. A., Levin A. I., Lyglayev A. V., Bol'shakov A. M. Mechanisms of destruction of polymeric material during crack propagation and branching / Deform. Razrush. Mater. 2008. N 2. P. 33 – 39 [in Russian].
4. Lisin Yu. V., Mahutov N. A., Neganov D. A., Studenov E. P., Skorodumov S. V. Integral mechanical tests in the strength calculations of the main pipeline for transportation of oil and oil products / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2018. Vol. 84. N 4. P. 47 – 59 [in Russian].
5. Nechaev Yu. S. New approaches, results and methods for solving actual problems of aging, hydrogen embrittlement and stress-corrosion damage of steel (analytical review) / Materialovedenie. 2009. N 3. P. 50 – 63 [in Russian].
6. Chuvil'deev V. N. The effect of aging on the performance properties of steel of gas mains. — N. Novgorod: Universitetskaya kniga, 2006. P. 18 – 67 [in Russian].
7. Filippov G. A., Livanova O. V., Dmitriev V. F. Degradation of metal properties during long-term operation of trunk pipelines / Stal'. 2003. N 2. P. 84 – 87 [in Russian].
8. Bol'shakov A. M., Burnashev A. V. Investigation of the stress-strain state of the main gas pipeline section with a bend / Bezopasn. Truda Promyshl. 2015. N 10. P. 40 – 42 [in Russian].
9. Lyglayev A. V., Bol'shakov A. M., Ivanov A. R. Assessment of the limiting state of metal structures operated in the Far North / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2009. Vol. 95. N 7. P. 44 – 47 [in Russian].
10. Murav'ev V. V., Zuev L. B., Komarov K. L. The speed of sound and the structure of steel and alloys. — Novosibirsk: Nauka, 1996. — 183 p. [in Russian].
11. Bol'shakov A. M., Burnashev A. V. Investigation of the toughness of steel of the gas pipeline after long-term operation in the conditions of the Far North / Deform. Razrush. Mater. 2018. N 8. P. 43 – 45 [in Russian].
12. Gladshstein L. I., Larionova N. P., Milievskii R. A. On the transition to the assessment of cold resistance of steel according to the results of testing samples with a sharp triangular notch / Promyshl. Grazhd. Stroit. 2008. N 2. P. 26 – 28 [in Russian].
13. Makhutov N. A., Lyglayev A. V., Bol'shakov A. M. Cold resistance (Engineering evaluation method). — Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2011. — 195 p. [in Russian].