

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ГАЗОПРОВОДА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НА СТЕНКУ ТРУБЫ

© 2024 г. А.В. Михайлов^{1,*}, Л.В. Михайлов¹, Н.Ю. Трякина^{2,**}, С.В. Трапезников², А.С. Саломатин², С.С. Кукушкин^{2,***}, Я.Г. Смородинский¹, В.Н. Костин¹, О.Н. Василенко¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Микеева УрО РАН,

Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»,

Россия 620075 Екатеринбург, ул. Клары Цеткин, 14

E-mail: *mikhaylov@imp.uran.ru; **N.Tryakina@ekaterinburg-tr.gazprom.ru;

***S.Kukushkin@ekaterinburg-tr.gazprom.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024; после доработки 20.06.2024

Принята к публикации 21.06.2024

Представлен анализ возможности образования сквозных дефектов газопровода в результате кратковременного воздействия дугового разряда. Приведены результаты металлографии, электронной микроскопии, элементного анализа, а также результаты моделирования, подтверждающие возможность образования сквозных дефектов в стенке газопровода толщиной 7 мм за время воздействия дугового разряда менее 2 с.

Ключевые слова: дефект, газопровод, дуговой разряд, металлография, электронная микроскопия, элементный анализ.

ANALYSIS OF THE GAS PIPELINE DEFECTS FORMATION MECHANISM AS A RESULT OF ARC DISCHARGE IMPACT ON THE PIPE WALL

© 2024 A.V. Mikhailov^{1,*}, L.V. Mikhailov¹, N.Yu. Tryakina^{2,**}, S.V. Trapeznikov², A.S. Salomatin², S.S. Kukushkin^{2,***}, Ya.G. Smorodinskii¹, V.N. Kostin¹, O.N. Vasilenko¹

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia 620137 Yekaterinburg, S. Kovalevskoy St., 18

²Gazprom Transgaz Yekaterinburg LLC, Russia 620075 Yekaterinburg, Klara Zetkin St., 14

E-mail: *mikhaylov@imp.uran.ru; **N.Tryakina@ekaterinburg-tr.gazprom.ru;

***S.Kukushkin@ekaterinburg-tr.gazprom.ru

The article presents an analysis of the formation possibility through defects in a gas pipeline as a result of short-term exposure to an arc discharge. The results of metallography, electron microscopy, elemental analysis, as well as the modeling results, confirming the formation possibility through defects in a 7 mm thick gas pipeline wall during an exposure to an arc discharge of less than 2 seconds are presented.

Keywords: defect, gas pipeline, arc discharge, metallography, electron microscopy, elemental analysis.

DOI: 10.31857/S0130308224090094

При обследовании газопровода, проходящего под высоковольтной линией 110 кВ, в районе верхней образующей трубы были обнаружены дефекты, внешний вид которых имел признаки воздействия электрической дуги, в том числе наплывы и брызги металла, оплавленные края кратера дефектов. На внутренней стенке трубы в зоне каждого дефекта выявлены локальные потемнения, характерные для термического воздействия на металл (рис. 1).

Было выдвинуто предположение о повреждении газопровода в результате воздействия мощного дугового разряда на стенку трубы с проплавлением металла и образованием сквозных дефектов. Такая ситуация может возникнуть, например, в результате удара молнии [1—3]. Для подтверждения предположения были подготовлены темплеты, содержащие дефектные участки трубы, а также проведены лабораторные исследования по определению структуры и элементного состава материала трубопровода в местах его повреждений и механические испытания. Рассмотрены сценарии возникновения мощных дуговых разрядов в грунте природного или техногенного характера.

По результатам локального **спектрального анализа** металла непосредственно в очаге дефектов установлено наличие повышенного количества примесных элементов (кремний, алю-

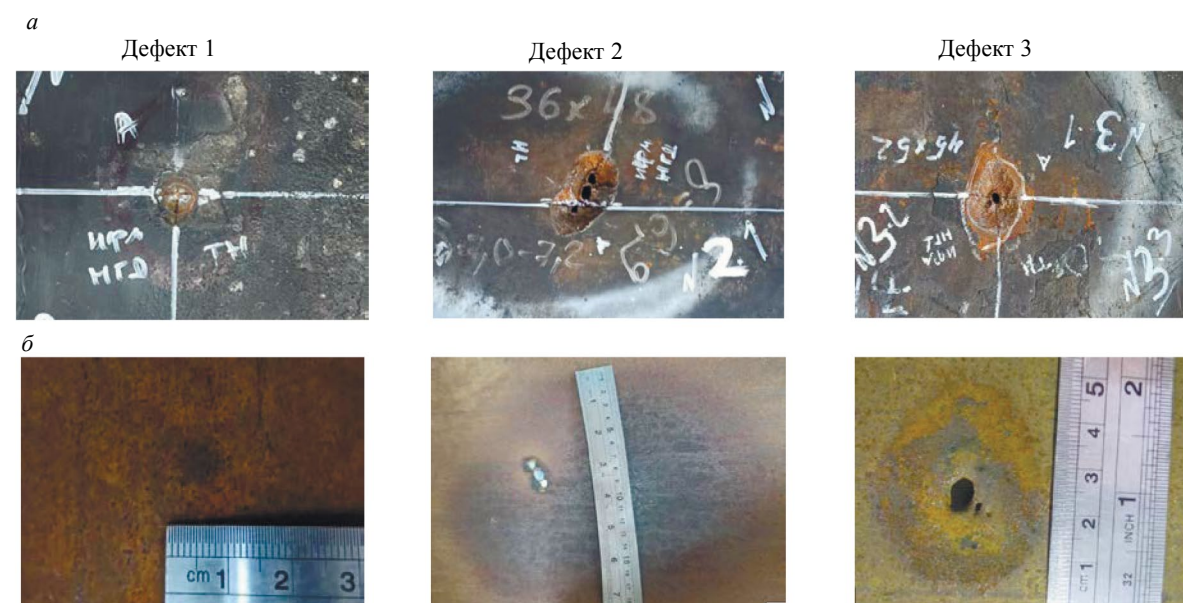


Рис. 1. Повреждения, выявленные при обследовании газопровода: наружная поверхность (*a*); внутренняя поверхность (*б*).

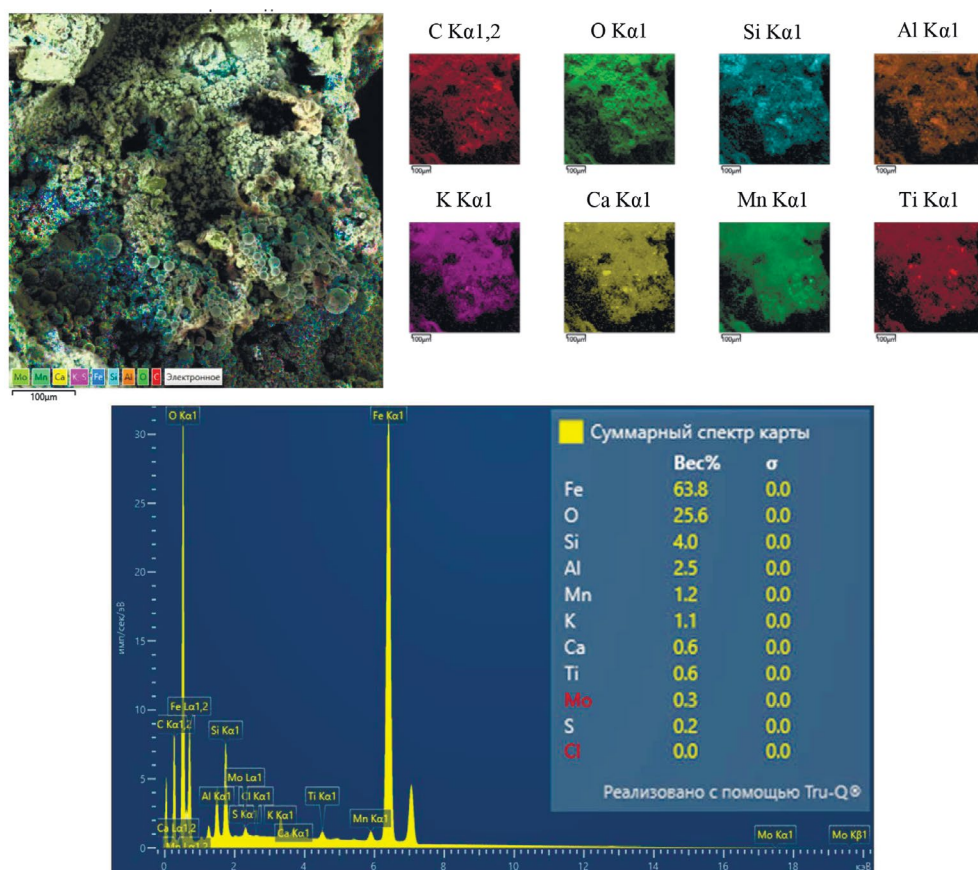


Рис. 2. Результаты элементного анализа вблизи очага дефекта.

миний, калий, кальций, титан) вследствие переноса их из грунта при высокотемпературном воздействии. Присутствие примесных элементов в грунте в месте укладки газопровода подтверждено также качественным **элементным анализом** (рис. 2).

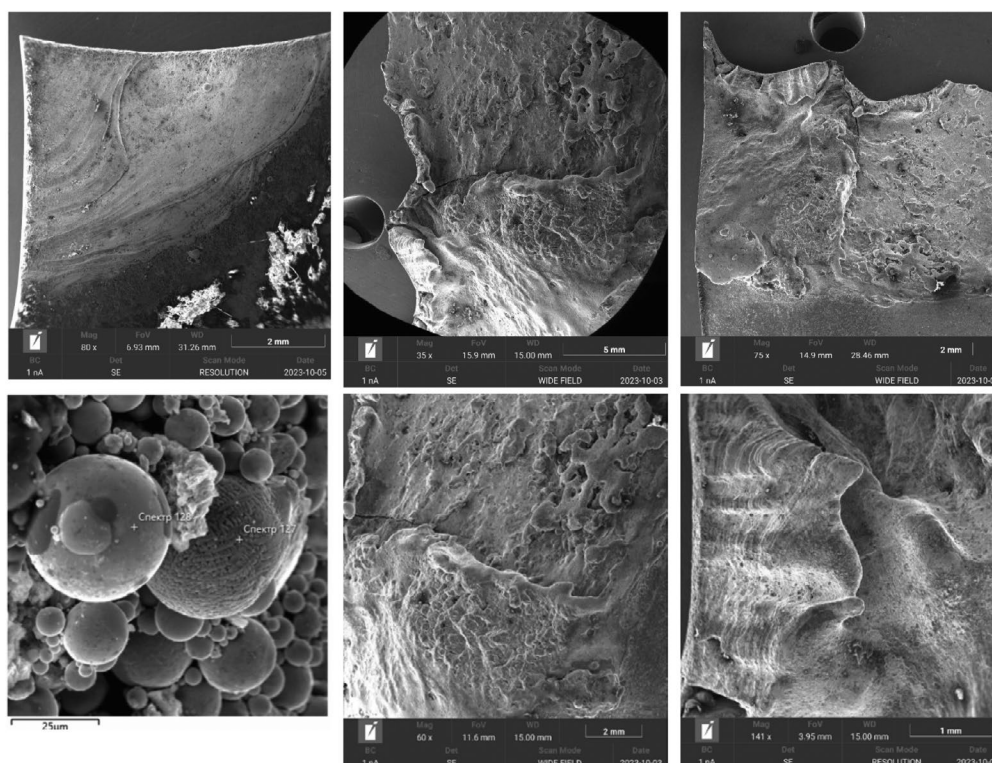


Рис. 3. Следы расплавления металла в зоне кратеров сквозных дефектов (электронная микроскопия).

После проведения **металлографических** исследований было установлено, что структура металла трубы вдали от дефектов — феррито-перлитная, характерная для горячекатаной низколегированной трубной стали. В зоне дефекта с малым проплавлением на глубину до 700 мкм от поверхности наблюдается слой металла, характеризующийся наличием участков столбчатой структуры, затем наблюдается переходная зона глубиной до 600 мкм со структурой неполного проплавления. Такая структура характерна для процессов формирования сварочной ванны. В случае образования дефектов с большим проплавлением на глубину до 700 мкм от поверхности установлено наличие зоны со структурой мартенсита, образование которого характерно для высокотемпературного нагрева с последующим резким охлаждением.

Электронно-микроскопический анализ показал, что на внешней поверхности трубопровода в кратере дефектов присутствуют множественные очаги оплавления металла, для которых характерны плавные линии внешних контуров, отдельные сформированные капли металла, напоминающие брызги (рис. 3). На внутренней поверхности трубопровода подобных явлений не наблюдается, что свидетельствует о высокотемпературном точечном воздействии именно на внешнюю поверхность трубы.

Измерения твердости по сечению стенки трубы (рис. 4) от поверхности вглубь образцов в зоне дефектов показали наличие резкого скачка твердости с 200—250 HV в основном металле до 450—600 HV в зоне закалочной структуры на поверхности. На расстоянии порядка 700 мкм от поверхности дефекта различима четкая граница, разделяющая подвергнутый термическому воздействию металл и основной. Данная картина характера для трех исследованных дефектов.

Расчет методом конечных элементов распространения зоны проплавления подтвердил, что множественные повреждения стенки трубопровода возможны в течение достаточно короткого времени воздействия дугового разряда: для толщины стенки трубы 6,5 мм оно составляет 1,8 с (рис. 5). При этом в случае множественных поражений стенки трубы для сквозного повреждения стенки трубопровода достаточно тока 200—300 А.

Сопоставление наблюдаемых и расчетных размеров повреждения позволяет заключить, что для указанного диапазона тока единичного разряда радиус дугового канала составляет величину порядка (3—7) мм. Принимая во внимание, что токи через единичный дуговой канал во время, например, разряда молнии характеризуются амплитудами 10—150 кА при длительности импульса до 100 мкс [4], можно предполагать, что указанного тока наряду с диффузной зоной

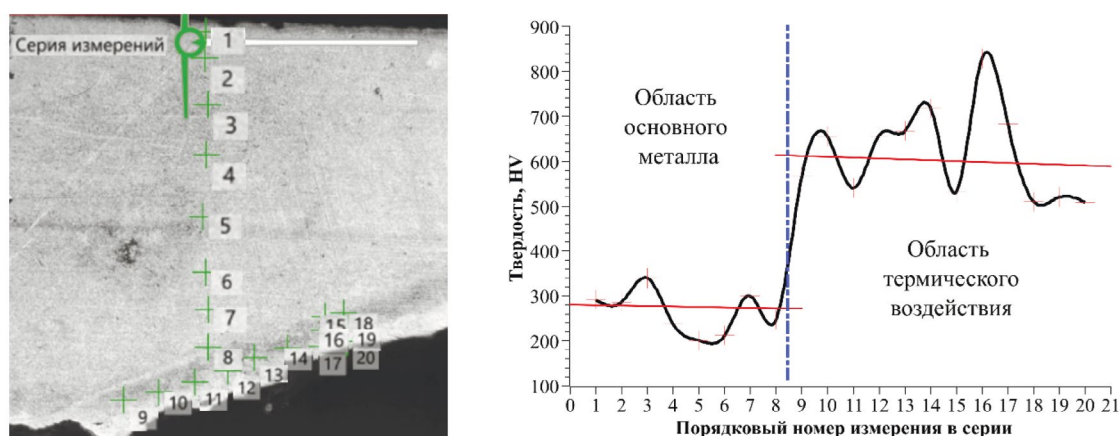


Рис. 4. Результаты измерения микротвердости для образца с дефектом.

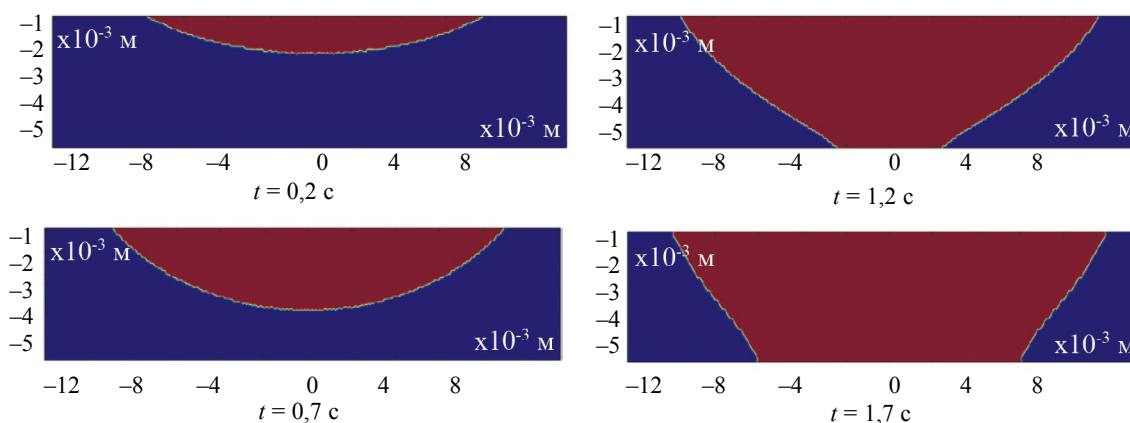


Рис. 5. Конфигурация зоны плавления в различные моменты времени, ток дуги 300 А, радиус канала 7 мм.

растекания достаточно для образования трех дуговых каналов с указанными в предыдущем пункте заключения токами, что соответствует числу повреждений, обнаруженных в стенке трубопровода.

Максимальная длина зарегистрированных в экспериментах [5] искровых каналов для характерных для молнии токов, стекающих с заземляющей проводящей структуры, составляет 10—20 м. Поэтому при инициации канализированной структуры при ударе молнии опасным расстоянием от места удара молнии до трассы трубопровода можно считать величину менее 20 м.

Теоретический анализ конфигурации зоны плавления вследствие распространения теплового потока плазменной дуги в различные моменты времени согласовывается с характером повреждений газопровода (см. рис. 1).

Таким образом, по результатам выполненных исследований показано, что вероятным механизмом повреждения трубопровода с образованием дефектов с оплавлением металла трубы явилось образование в грунте дугового разряда природного или техногенного характера.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», Г.р. № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Venturino P., Booman J.N., Gonzalez M.O., Otegui J.L. Pipeline failures due to lightning // Engineering Failure Analysis. 2016. P. 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.021>
2. Quickel G.T., Beavers J.A. Pipeline Failure Results from Lightning Strike: Act of Mother Nature? // J. Fail. Anal. and Preven. 2011. V. 11. P. 227—232. <https://doi.org/10.1007/s11668-011-9447-y>

3. *Pikas J., Shoaf W.* The lightning threat to pipelines and coatings // *Journal of Pipeline Engineering*. 2010. V. 9. Is. 3. P. 191.
4. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащита. М.: Физматлит, 2001. 320 с. Текст: непосредственный.
5. *Вилков Ю.В., Кравченко А.С., Саиткулов М.М., Селемир В.Д., Терехин В.А., Тютяев А.А.* Формирование токового импульса молнии отрицательной полярности с помощью взрывомagnetного генератора // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 3. С. 64—71.

REFERENCES

1. *Venturino P., Booman J.N., Gonzalez M.O., Otegui J.L.* Pipeline failures due to lightning // *Engineering Failure Analysis*. 2016. P. 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.021>
2. *Quickel G.T., Beavers J.A.* Pipeline Failure Results from Lightning Strike: Act of Mother Nature? // *J. Fail. Anal. and Preven.* 2011. V. 11. P. 227—232. <https://doi.org/10.1007/s11668-011-9447-y>
3. *Pikas J., Shoaf W.* The lightning threat to pipelines and coatings // *Journal of Pipeline Engineering*. 2010. V. 9. Is. 3. P. 191.
4. *Bazelyan E.M., Rajzer Yu.P.* Fizika molnii i molniezashchita. M.: Fizmatlit, 2001. 320 p. (In Russian).
5. *Vilkov Yu.V., Kravchenko A.S., Saitkulov M.M., Selemir V.D., Terekhin V.A., Tyutyayev A.A.* Formirovaniye tokovogo impul'sa molnii otricatel'noj polyarnosti s pomoshch'yu vzryvomagnitnogo generatora // *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2007. Is. 3. P. 64—71. (In Russian).