

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ШАХТНЫХ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК

*Козловская А.П.*

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва*

**Ключевые слова:** коррозия, нержавеющая сталь, трубопровод, аустенитная сталь, эксплуатация, производство.  
**Аннотация.** В настоящей статье рассматривается зарождение и распространение коррозии в объектах промышленности в частности в трубопроводах шахтных водоотливных установок. В работе представлены результаты исследования образцов трубопроводов, подвергшихся воздействию коррозионного разрушения, и определены виды коррозии на образцах. Рассмотрены причины возникновения и развития коррозионных процессов, основанные на анализе производственных факторов, включающих в себя особенности материала и технологии изготовления, а также эксплуатационных факторов, к которым относятся особенности рабочей жидкости и режимы работы рассматриваемой установки. В выводах к статье представлены методы борьбы с возникновением и развитием коррозионного разрушения в трубопроводах шахтных водоотливных установок в виде замены материала труб, корректировки режимов термообработки и отстаивания рабочей жидкости.

## RESEARCH OF THE MINE DRAINAGE SYSTEM'S PIPELINES CORROSION

*Kozlovskaya A.P.*

*National university of science and technology «MISIS», Moscow*

**Keywords:** corrosion, stainless steel, pipeline, austenitic steel, exploitation, manufacture.

**Abstract.** This article discusses the origin and spread of corrosion in industrial facilities, in particular in the pipelines of mine drainage installations. The paper presents the results of the study pipelines' samples exposed to corrosion destruction, and the types of corrosion on the samples were determined. The causes of the occurrence and development of corrosion processes were considered, based on the analysis of production factors, including the features of the material and manufacturing technology, as well as operational factors, which includes the characteristics of the working fluid and operating modes of the installation. In the conclusions corrosion prevention methods are presented, they include substitution of pipe material, adjusting heat treatment modes and settling of working fluid.

### **Введение**

В современном мире основным конструкционным материалом современного оборудования и технологических машин является металл и его сплавы, в связи с этим металлоемкость конструкций безостановочно растет, как и стоимость металлов и сплавов. Первое связано с развитием различных отраслей промышленности, второе – с увеличением себестоимости производства материалов, основанном на необходимости совершенствования процессов и обновления оборудования. При этом от качества материалов непосредственно зависит надежность и долговечность получаемых изделий.

В зависимости от назначения изделий определяют стоимость материалов, применяемых при изготовлении. Так, например, в горной и нефтегазовой промышленности оборудование эксплуатируется в условиях агрессивных сред, высоких температур и давлений. На этапе разработки изделий это учитывается путем применения дорогостоящих легированных сталей.

При этом применение нержавеющей сталей не является гарантией того, что изделие не подвергнется коррозии. Данное явление относится к глобальным проблемам промышленности и экономики, поскольку влияет на стоимость изделий не только напрямую – за счет затрат на антикоррозионную защиту или необходимость замены оборудования целиком или его частей, основанную на последствиях разрушения металла, но и косвенно – за счет простоев оборудования.

Согласно приведенной в [1] статистике, очевидно, что коррозионный износ является наиболее частой причиной потери работоспособности трубопроводов нефтегазовых и внутрипромысловых сооружений, так как именно данный вид разрушения вызывает порядка

70 % отказов и аварий в нефтяной промышленности, 37 % в системах газопроводов и 95 % в системах внутрипромысловых трубопроводах. В частности, для парогенераторных установок [2] назначенный срок службы составляет 10 лет, при этом коррозионный износ возникает гораздо раньше, из-за чего спустя 2 года изделие полностью выходит из строя. Появление коррозии в установках шахтного водоотлива приводит к простоям в рабочих процессах, так как зачастую оборудование должно работать бесперебойно с остановками на планово-предупредительные ремонты в течение срока службы.

### **Анализ характера повреждений элементов трубопроводов**

В данной статье в качестве объекта исследования рассматриваются трубопроводы водоотливных установок, предметом исследования являются причины возникновения коррозионного разрушения в них. На основании этого целью исследования является разработка предложений, способствующих предотвращению зарождения и развития коррозии. Актуальность рассматриваемого вопроса заключается в том, что элементы трубопроводов подвергаются не только сплошной коррозии, но и сразу нескольким видам местной коррозии, а также коррозионному растрескиванию, это наносит большой экономический ущерб эксплуатирующим организациям из-за простоев производства в период репарации, ремонта и аварийных остановок оборудования [3].

В качестве образцов для проведения исследования были рассмотрены части трубопроводов, вышедшие из строя из-за масштабного коррозионного разрушения, возникшего в процессе эксплуатации.

Визуальный осмотр образцов выявил преобладание местной коррозии различных видов. Наличие данного вида разрушения опасно тем, что, несмотря на малые потери металла, изделия выходят из строя полностью. На образцах были обнаружены следующие виды местной коррозии.

– Язвенная коррозия (рис. 1, а) – вид разрушения, при котором диаметр участка, подверженного коррозии, соизмерим с глубиной разрушения.

– Коррозия пятнами (рис. 1, б и в), при которой диаметр пятна значительно превышает глубину проникновения коррозии [3], этот вид разрушения характерен для всех образцов. При этом он представлен как в виде сплошных участков (рис. 1, б), так и в виде отдельных очагов (рис. 1, в).

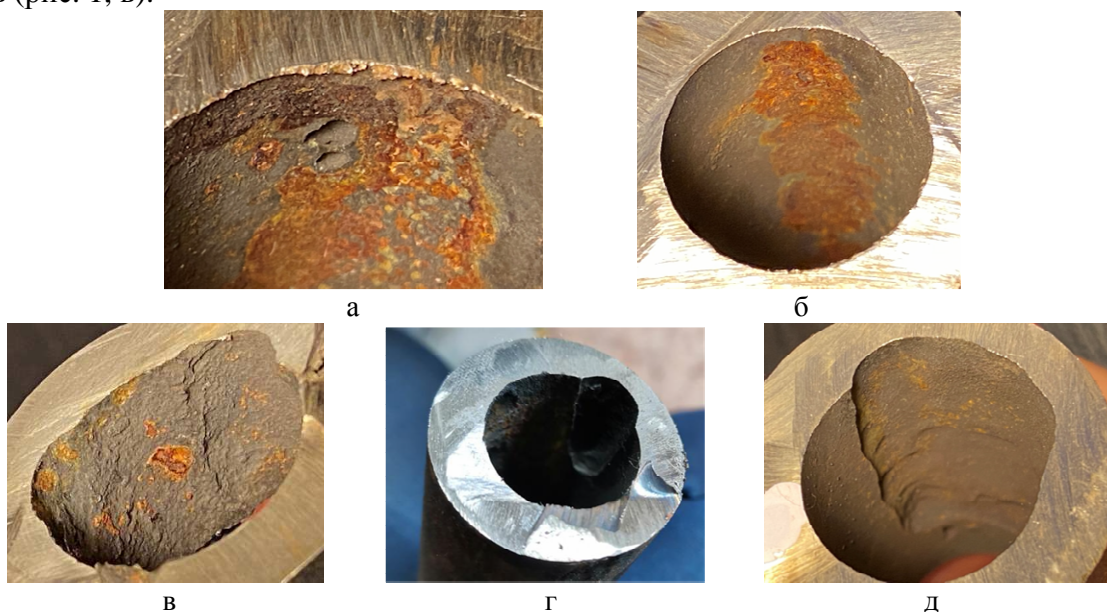


Рис. 1. Исследуемые виды коррозии: а – язвенная, б – сплошная пятнами, в – точечная, г и д – канавочная

– Канавочная коррозия (рис. 1, г и д), характеризующаяся тем, что её очаги имеют вид прямоугольной канавки, расположенной в области нижней образующей труб. Данное

разрушение наиболее часто является причиной разрывов труб и, как следствие, приводит к значительному экологическому ущербу [1]. Это происходит из-за того, что канавочная коррозия отличается очень высокой скоростью разрушения металла – от 4 до 8 мм/год, но может достигать и 18 мм/год. В подтверждение наличия данного вида коррозии также были предоставлены материалы, в которых отражалось наличие утечек рабочей среды.

Помимо местной коррозии на образцах трубопроводов присутствует коррозионное растрескивание в радиальном (см. рис. 2, а) и продольном (см. рис. 2, б) направлениях.



Рис. 2. Коррозионное растрескивание образцов: а – радиальное растрескивание, б – продольное растрескивание

### **Механизм развития коррозионных процессов в трубопроводах**

Вышеуказанные виды коррозии могут возникать в процессе производства и эксплуатации, к ним относятся следующие этапы жизненного цикла изделий:

- проведение проектных работ, разработки рабочей конструкторской документации и подготовки производства, так как на этом этапе происходит выбор материалов изделия и разработка технологических процессов изготовления, программ и методик испытаний;

- изготовление изделий и испытаний – входной контроль материала (дефект материала), отклонения от технологического процесса (нарушение режимов термообработки, гибки и пр.)

- эксплуатация и ремонт оборудования – внешние воздействующие факторы: окружающая среда, параметры состава рабочей жидкости, а также циклические нагрузки.

Ключевой производственной причиной возникновения коррозии является материал изделия. Исследуемые образцы изготовлены из высоколегированной хромоникелевой стали аустенитного класса марки 12X18H10T по ГОСТ 5632-2014. Наличие в химическом составе хрома и титана обеспечивает высокую коррозионную стойкость материала. Хром при взаимодействии с кислородом выходит на поверхность материала и образует оксид хрома  $Cr_2O_3$ , который образует пассивирующий слой. Титан в аустенитной стали образует карбиды, снижает ее склонность к межкристаллитной коррозии, а также способствует измельчению зерен аустенита.

Несмотря на нержавеющие свойства таких сталей, согласно [4] изделия все равно выходят из строя из-за межкристаллитной коррозии, особенно это свойственно элементам оборудования, подвергавшимся пластическим деформациям, что характерно для трубопроводов. Данный тип коррозии свойственен аустенитным сплавам поскольку он связан с выделением карбидов хрома, образующихся на границах зерен. Наличие никеля в составе стали повышает активность углерода, чем увеличивает склонность стали к карбидообразованию. Образованию карбидов (см. рисунок 3) сопутствует нагрев и выдержка стали в процессе термообработки, оно состоит из следующих этапов [1]:

- частицы углерода, обладающие большей по сравнению с частицами хрома коэффициентом диффузии, выделяются на поверхность металла с границ зерен, а также из основного металла;

- при этом частицы хрома могут поступать только из приграничной области, и их количество не может восполняться диффузией из основного металла за определенный промежуток времени.

Как следствие в элементах трубопроводов, подвергавшихся термическому воздействию и пластическим деформациям, имеются обедненные хромом зоны, появившиеся в результате того, что карбиды хрома выстраиваются в цепочки вдоль границ зерен (см. рис. 3), когда прилегающая к границе зона испытывает дефицит хрома (см. рис. 3, красная зона).

Стоит отметить, что скорость межкристаллитной коррозии прямо пропорционально зависит от разности концентраций хрома в приграничной зоне и в теле зерна.

Это приводит к тому, что процесс пассивации поверхности трубопроводов проходит неравномерно, так как для данного процесса необходим хром в количестве более 12%. В результате приграничная зона зерен металла не участвует в образовании пассивирующего слоя, вызывает окисление стали и снижение прочности стенок труб на данном участке и приводит к межзеренному разрушению. В процессе эксплуатации это приводит к тому, что при контакте с рабочей средой обедненные хромом области начинают растворяться в транспортируемой среде.

В качестве заготовок для изготовления трубопроводов используется сортамент, изготавливаемый по ГОСТ. При его изготовлении и приемке допускается определенная доля отклонений, например, для бесшовных холодно- и теплодеформированных труб, получаемых по ГОСТ 9941-81, допускается проводить зачистку дефектов шлифовкой, расточкой и обточкой при сохранении размера толщины стенки в пределах допуска. Такие доработки приводят к тому, что целостность пассивирующего слоя нарушается и происходит окисление участков металла. Помимо этого, на поверхностях допускаются риски, вмятины, царапины, что приводит к точечной коррозии, накоплению осадка и загрязнений, из-за отклонений микропрофиля поверхности, вызванных данными допущениями.

На этапе производства изделия подвергаются термообработке [6] путем закалки или отжига. При соблюдении технологии закалка является более качественным методом предотвращения коррозии, так как ее проводят на температурах, при которых карбиды хрома растворяются, а последующее резкое охлаждение в воде предотвращает их выделение. Недостатком закалки является ограничение габаритов обрабатываемых изделий – в случае с крупногабаритными деталями она может привести к поводке и короблению, из-за чего при изготовлении зачастую отдают предпочтение стабилизирующему отжигу [7]. Его недостатком является то, что температура нагрева ниже, чем при закалке, из-за этого карбиды хрома не растворяются, а лишь переходят в неопасное состояние, следовательно, при дальнейших термических воздействиях в процессе формообразования и эксплуатации, возникновение межкристаллитной коррозии неизбежно.

Как уже упоминалось ранее, элементы трубопроводов подвергаются пластической деформации в процессе изготовления, перед выполнением таких операция заготовки нагревают, чтобы снизить внутренние напряжения и сохранить профиль поперечного сечения. В качестве формообразующей операции для трубопроводов применяется гибка, во время ее выполнения могут образовываться продольные трещины, как на рисунках 2 и 4, границы которых из-за нарушения сплошности пассивирующего слоя под воздействием перемещения рабочей среды вымываются, что приводит к образованию канавок на внутренней поверхности труб (см. рис. 1, г и д) и как следствие локализации механического фактора, которая приводит к ускоренному разрушению конструкции.

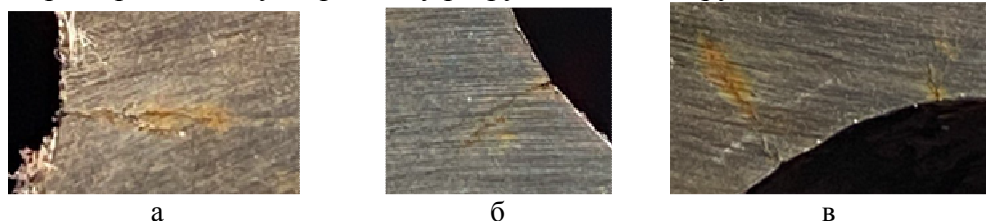


Рис. 4. Трещины на внутреннем диаметре образцов

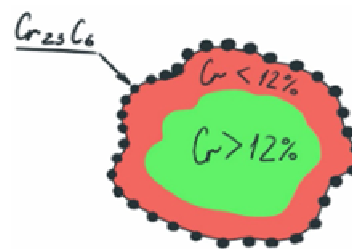


Рис. 3. Условное изображение зерна аустенитной стали при образовании карбидов хрома

В [1] указано, что в напряженном состоянии все сплавы подвергаются коррозионному растрескиванию, в частности в нефтегазовой, химической и теплоэнергетической



промышленности данному виду коррозии подвергается от 20% до 40% коррозионных разрушений. Кроме внутренних напряжений к коррозионному растрескиванию также приводит эксплуатация при повышенных температурах и давлениях.

В условиях эксплуатации водоотливные установки имеют циклы пусков-остановов, что также является причиной коррозионного растрескивания [4, 5], которое зарождается в следующей последовательности [10]:

- 1 – с остановкой оборудования внутреннее давление уравнивается с давлением окружающей среды;
- 2 – из-за внутреннего разрежения изделие заполняется воздухом;
- 3 – остатки рабочей жидкости внутри труб насыщаются кислородом;
- 4 – оголенные участки металла подвергаются электрохимической коррозии с рабочей жидкостью.

Помимо режимов работы на возникновение коррозии в изделиях влияет рабочая среда, ее характеристики влияют на коррозионную стойкость всего изделия [8, 9]. Поэтому рабочая жидкость с большим содержанием взвешенных частиц, поступающая в установку, приводит к возникновению и развитию канавочной коррозии, которая была отображена на рисунке 1, г и д. Данный тип коррозии образуется на внутренней поверхности трубы из-за того, что на ней в процессе эксплуатации скапливается осадок (см. рис. 5).

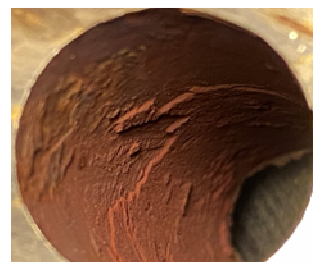


Рис. 5. Осадок на внутренней поверхности трубопровода

Данный тип коррозии обладает высокой скоростью разрушения – 4...8 мм/год. Это связано непосредственно с процессом ее развития (см. рисунок 6) [1]:

- 1) оксиды и соли железа, образованные в результате коррозионного процесса и полученные из воды, формируют осадок (рисунок 6, I);
- 2) часть осадка вымывается потоком жидкости, из-за этого часть основного металла трубы обнажается (рисунок 6, II);
- 3) в системе трубопроводов образуется гальваническая пара, что приводит к образованию трещин (рисунок 6, III и IV).

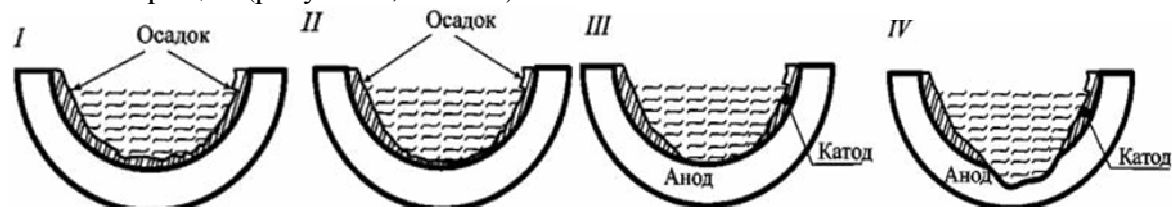


Рис. 6. Стадии формирования очагов канавочной коррозии: I – формирование осадка; II – износ осадка в области нижней образующей; III – образование гальванопары; IV – разрушение металла [1]

### Выводы

По результатам проведенного исследования предлагаются следующие методы борьбы с коррозией, возникающей в трубопроводах шахтных водоотливных установок:

- заменить материал 12X18H10T на легированный большим количеством титана и ниобия, так как они образуют соединения с углеродом взамен карбидов хрома, при этом хром остается распределенным равномерно в теле зерна. Количество этих элементов должно превосходить количество углерода в 5 раз для титана и 8-10 - для ниобия. Также предлагается уменьшить массовую долю углерода в металле до 0,03 %, и дополнительно легировать материал молибденом, вольфрамом, ванадием или марганцем для снижения активности углерода;
- по возможности проводить термообработку путем закалки для растворения карбидов хрома;
- по завершении механических (зачистка) и термических операций подвергать изделия пассивации для восстановления структуры поверхностного слоя с помощью таких окислителей, как бихромат натрия;

– очищать рабочую жидкость от примесей путем отстаивания ее в водосборниках [8].

#### Список литературы

1. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии: учебное пособие – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2010. – 416 с.
2. Мобильная парогенераторная установка (МПУ) [Электронный ресурс]. – URL: <http://giotek.ru>.
3. Рачев Х.Д., Стефанова С.Т. Справочник по коррозии – М.: Мир, 1982. – 520 с.
4. Горицкий В.М. Диагностика металлов – М.: Metallurgizdat, 2004. – 408 с.
5. Лазуткина О. Р. Химическое сопротивление и защита от коррозии: учебное пособие – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. – 141 с.
6. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. – М.: Машиностроение, 2010. – 528 с.
7. Шубина Н.Б. Материаловедение в горном машиностроении: учебное пособие – 2-е изд., испр. и перераб. – М.: Горная книга, 2011. – 269 с.
8. Романовский В.И., Пэр М.К., Хедберг И., Крышилович Е.В., Лихавицкий В.В. Коррозионные аспекты использования растворов гипохлоритов и озона для дезинфекции сооружений водоснабжения [Электронный ресурс] // «Вода Magazine». – URL: <https://watermagazine.ru/nauchnye-stati2/arkhiv/22489-korrozionnye-aspekty-ispolzovaniya-rastvorov-gipokhloritov-i-ozona-dlya-dezinfeksii-sooruzhenij-vodosnabzheniya.html>.
9. Зайцев А.Н., Суздальцева Е.Н. К вопросу о коррозии труб горячего водоснабжения из нержавеющей стали // Системные технологии. – 2017. – № 23. – С. 4-14.
10. Антикайн П.А. Коррозия металла парогенераторов – М.: Энергия, 1997. – 112 с.

#### References

1. Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A. V. Corrosion and corrosion protection: textbook – 3rd ed., revised. and additional – М.: Fizmatlit, 2010. – 416 p.
2. Mobile steam generator unit (MPGU) [Electronic resource]. – Access mode: <http://giotek.ru>.
3. Rachev Kh.D., Stefanova S.T. Handbook of corrosion. – М.: World, 1982. – 520 p.
4. Goritsky V.M. Diagnostics of metals – М.: Metallurgizdat, 2004. – 408 p.
5. Lazutkina O. R. Chemical resistance and corrosion protection: textbook. – Yekaterinburg: Ural University Press, 2014. – 141 p.
6. Lakhtin Yu.M., Leontiev V.P. Materials Science: Textbook for higher technical educational institutions. – М.: Mechanical Engineering, 2010. – 528 p.
7. Shubina N. B. Materials science in mining engineering: textbook. – 2nd ed., rev. and reworked. – М.: Mining Book, 2011. – 269 p.
8. Romanovsky V.I., Peer M.K., Hedberg I., Kryshilovich E.V., Likhavitsky V.V. Corrosion aspects of using hypochlorite and ozone solutions for disinfection of water supply facilities [Electronic resource] // "Water Magazine". – Access mode: <https://watermagazine.ru/nauchnye-stati2/arkhiv/22489-korrozionnye-aspekty-ispolzovaniya-rastvorov-gipokhloritov-i-ozona-dlya-dezinfeksii-sooruzhenij-vodosnabzheniya.html>.
9. Zaitsev A.N., Suzdaltseva E.N. On the issue of corrosion of stainless steel hot water pipes. // System technologies. 2017, no. 23, pp. 4-14.
10. Anticaine P.A. Metal corrosion of steam generators. – М.: Energy, 1997. – 112 p.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Козловская Алена Павловна</b> – аспирант <a href="mailto:alyona.kozlovskaya29@yandex.ru">alyona.kozlovskaya29@yandex.ru</a>
---

<b>Kozlovskaya Alyona Pavlovna</b> – postgraduate student
---

Получена 08.06.2023