

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.172:620.178

### ОЦЕНКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. А.Г. КУЛЬБЕЙ, А.С. БОНДАРЕВ  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*Установлены повреждения оборудования нефтехимического комплекса, касающиеся магистральных нефтегазопроводов, с выделением устранимых и неустранимых неисправностей. Эксплуатация трубопровода со стенками, пораженными общей коррозией, может быть продлена, если их толщина находится в допустимых пределах, установленных нормативными документами. Ударная вязкость материала конструкций может быть использована в качестве основного свойства среди других механических свойств при оценке склонности материала к хрупкому разрушению. Она обладает высокой чувствительностью к эксплуатационной деградации как основного металла, так и материала сварных соединений. Предложена технология восстановительного ремонта линейной части магистральных трубопроводов, позволяющая повысить примерно в два раза ударную вязкость их материала с продлением срока службы трубопровода до следующего диагностирования.*

**Ключевые слова:** *оборудование нефтехимического комплекса, магистральные трубопроводы, повреждение, остаточный ресурс, восстановление.*

**Введение.** Оборудование нефтехимического комплекса связано с переработкой и перемещением взрывопожароопасных и агрессивных высокотоксичных веществ при высокой температуре (до 550 °С) и давлении (до 10 МПа). Работа этого оборудования отличается возрастающей интенсификацией технологических процессов с повышением их основных параметров. Более 60% опасного в технологическом отношении нефтеперерабатывающего оборудования (НПО), подконтрольного органам Госпромнадзора, эксплуатируется свыше 30 лет и выработало нормативный срок службы. Замена сложного и дорогостоящего оборудования новым не представляется возможным по причине нехватки финансовых средств. Поэтому для такого оборудования исследуется и назначается остаточный ресурс по критерию безопасности.

Чрезвычайные ситуации, обусловленные достижением предельного состояния нефтехимического оборудования, приводят к экономическим издержкам, связанным с дорогостоящим ремонтом и неиспользуемой выгодой от реализации продукции, человеческим травмам и жертвам, а также к загрязнению окружающей среды. Около 43% инцидентов связаны с эксплуатационным повреждением материала этого оборудования, 10% причин травматизма – с разрушением его частей. Более половины причин инцидентов сопряжены со снижением механических свойств материала и потерей несущей способности конструкции во время эксплуатации по причине старения материала, в т.ч. из-за его коррозии.

Можно предположить, что без принятия необходимых мер количество отказов оборудования будет расти [1]. Опыт его эксплуатации показывает, что увеличение срока службы без научного обоснования может приводить к аварийным разрушениям. Изменения материала оборудования должны быть выявлены на ранней стадии их проявления путем контроля этого материала, т.е. одним из основных направлений решения задачи безопасной работы нефтеперерабатывающего оборудования является мониторинг структуры и свойств материала при эксплуатации.

**Основная часть.** В материале трубопроводов, например, выявляют следующие повреждения, которые учитывают при оценке его состояния и определении остаточного ресурса:

- общая поверхностная коррозия (рисунок 1);
- межкристаллитная коррозия (рисунок 2);
- сероводородное расслоение (рисунок 3);
- коррозионное растрескивание под напряжением (рисунок 4);
- тепловая хрупкость (рисунок 5);
- сфероидизация перлита (рисунок 6).

Общая поверхностная коррозия приводит к постепенному уменьшению толщины стенки элементов оборудования. Срок эксплуатации оборудования ограничивается временем до достижения минимального значения толщины стенки.

В развитии коррозионных процессов значительна роль химического состава и структуры сталей. При протекании электрохимических процессов коррозии гетерогенность структуры материала с разными электродными потенциалами способствует локальной коррозии. Межкристаллитная коррозия свойственна хромоникелевым сталям и проявляется в образовании сетки трещин по границам зерен, обедненным хромом. Срок службы оборудования из этих сталей определяется временем образования в стали склонности к межкристаллитной коррозии.



Рисунок 1. – Общая коррозия трубы змеевика печи (сталь 20)

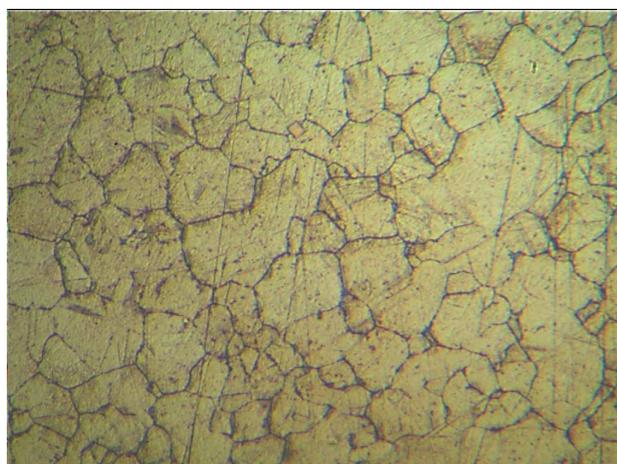


Рисунок 2. – Межкристаллитная коррозия стали 12Х18Н10Т (труба сажеобдувателя) (x500)



Рисунок 3. – Сероводородное расслоение стенки пропановой емкости

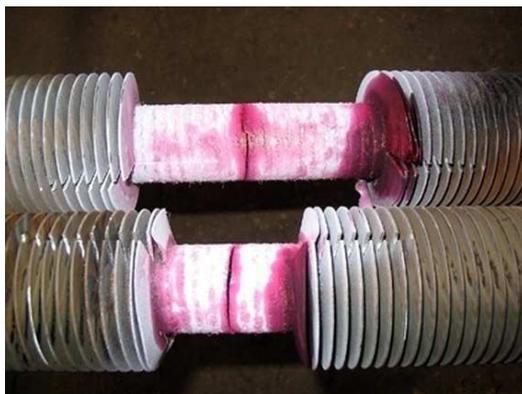


Рисунок 4. – Коррозионное растрескивание под напряжением труб подогревателя



Рисунок 5. – Разрушение сварного соединения трубопровода вследствие тепловой хрупкости металла

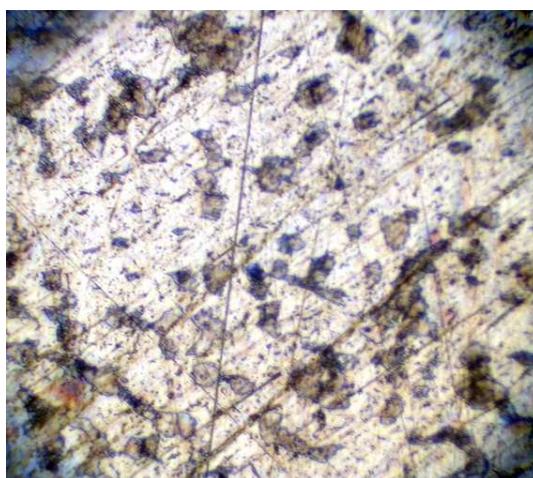


Рисунок 6. – Сфероидизация перлита в структуре металла ректификационной колонны (феррит + перлит) (сталь ВСтЗсп, увеличение  $\times 400$ )

Сероводородное расслоение материала относится к замедленному разрушению и возникает вследствие продолжительной эксплуатации оборудования в сероводородсодержащей среде. Расслоение возникает из-за проникновения атомарного водорода в поверхностный слой материала, его диффузии вглубь толщины стенки и скопления вблизи несплошностей (поры, пустоты) и включений (сульфиды, окисульфиды и др.). Водород образуется при взаимодействии водного раствора сероводорода с железом. Время эксплуатации оборудования с таким повреждением материала ограничено предельно допустимым размером расслоений. Наибольшую склонность к образованию отдулин обнаруживают сосуды и аппараты из кремнемарганцевых (09Г2С, 16ГС) и марганцовистых (09Г2, 14Г2) сталей.

Коррозионное растрескивание под напряжением возникает под действием на материал статических растягивающих напряжений и среды, содержащей ионы хлора. При этом в микроструктуре материала наблюдаются повреждения в виде растрескивания по участкам, обладающим наименьшей коррозионной стойкостью.

Тепловая хрупкость возникает по причине охрупчивания материала при длительном воздействии высокой температуры (250–550 °С), вызывающей снижение прочности материала по границам зерен и выделения по этим границам частиц дисперсной фазы.

При сфероидизации перлита происходит превращение его составляющей структуры в виде выделения цементита сферической формы. При этом границы перлитных зерен размываются, и возникает большое количество обособившихся сферических частиц цементита по границам зерен. Последствием сфероидизации перлита является развитие межзеренной хрупкости и снижение пластичности.

Применительно к магистральным нефтепроводам диаметром от 377 до 720 мм, длина которых на территории Республики Беларусь составляет 4112 км, предельным состоянием являются межкристаллитная коррозия, сероводородное расслоение и коррозионное растрескивание под напряжением (в виде трещин). С допустимой толщиной стенок, пораженных коррозией, эксплуатация трубопровода может быть продлена, а тепловая хрупкость и сфероидизация перлита могут быть устранены.

Научные основы определения остаточного ресурса оборудования с целью принятия решения о возможности его дальнейшей безопасной эксплуатации включают определение критериев достижения предельного состояния и установление механизма деградации материала. Оценка остаточного ресурса НПО проводится путем экстраполяции изменения значений измеряемых характеристик, определенных при текущем диагностировании, при сохранении существующих условий эксплуатации (рисунок 7).

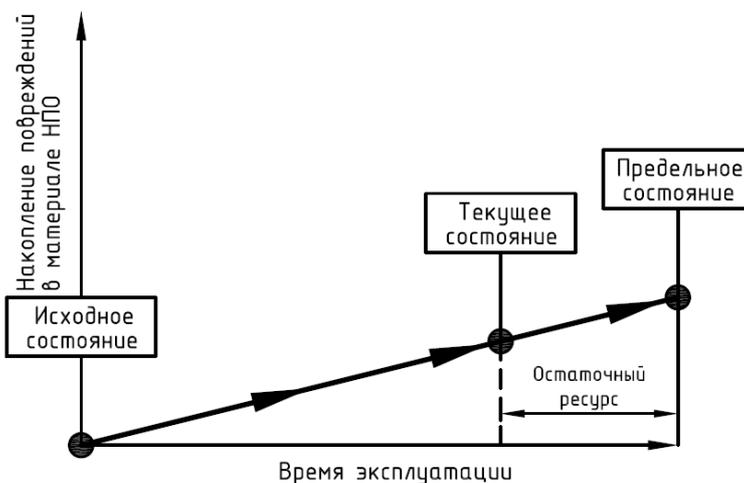


Рисунок 7. – Схема определения остаточного ресурса оборудования

Остаточный ресурс оборудования и трубопроводов  $T_{ост}$ , повреждающим фактором для которых является уменьшение толщины стенок из-за общей коррозии, определяют по формуле<sup>1,2</sup>

$$T_{ост} = k \frac{S_{ф} - S_{о}}{A_{ф}}, \text{ лет}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Методика оценки остаточного ресурса технологических трубопроводов. – Волгоград : АОТ «ВНИКТИнефтехимоборудование», 1996. – 25 с.

<sup>2</sup> Неразрушающий контроль и диагностика : справ. / В.В. Клюев [и др.] ; под ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2002. – 488 с.

где  $k$  – коэффициент, зависящий от категории и срока службы объекта ( $k = 0,9-1,0$ );

$S_{\phi}$  – фактическая толщина элемента, мм;

$S_0$  – отбраковочная (предельная) толщина элемента, мм;

$A_{\phi}$  – скорость коррозионного изнашивания, мм/год.

Толщину элементов конструкции измеряют ультразвуковыми толщиномерами во время ее диагностирования.

Классический подход к анализу материала конструкций НПО предусматривает оценку во взаимосвязи изменений во времени его химического состава, структуры и механических свойств в зависимости от влияния внешних факторов (температуры, давления и воздействия агрессивных сред). Пониженные значения пределов текучести и прочности, относительного удлинения и ударной вязкости обусловлены старением материала в течение длительной эксплуатации. Предложены корреляционные уравнения механических свойств материалов в зависимости от химического состава материала сталей [2]:

$$\sigma_b = 28,31C + 13,39Mn + 10,30Si + 18,61S + 57,53P + 28,92; \quad (2)$$

$$\sigma_{0,2} = 24,17C + 8,14Mn + 8,56Si + 2,36S + 45,74P + 18,19; \quad (3)$$

$$\delta_5 = -32,37C - 8,05Mn - 14,11Si - 104,37S - 53,96P + 47,78, \quad (4)$$

где  $\sigma_b$  – предел прочности, МПа;

$\sigma_{0,2}$  – предел текучести, МПа;

$\delta_5$  – относительное удлинение, %;

C, Mn, Si, S и P – содержание в стали углерода, марганца, кремния, серы и фосфора, соответственно.

Однако достоверность определения механических характеристик по приведенным данным невелика (коэффициенты корреляции – 0,33; 0,44 и 0,35<sup>3</sup> для уравнений (1), (2) и (3), соответственно). Таким образом, методы, основанные на использовании химического состава материала оборудования нефтехимического комплекса, не могут быть применены при определении структурного состояния и механических свойств этого материала.

Особое место среди других механических свойств занимает ударная вязкость – ее значение характеризует склонность материала к хрупкому разрушению [3], она обладает высокой чувствительностью к эксплуатационной деградации основного металла и сварных соединений материала конструкции. Если при оценке старения сталей по пределу прочности отсеивают 20% конструкций, по пределу текучести – 14%, по относительному удлинению – 28%, то по ударной вязкости (которая не учитывается в расчетах на прочность) – 46% конструкций [1]. В связи с этим целесообразно использовать ударную вязкость в качестве основной характеристики динамики деградации механических свойств материала нефтехимического оборудования.

Восстановление пластичных свойств материала нефтегазопроводов обеспечивает рекристаллизационный отжиг [3], включающий нагрев кольцевого элемента трубопровода до температуры 680–700 °С, выдержку при этой температуре в течение 40–50 мин и охлаждение на воздухе<sup>4</sup>. Нагрев изделия до указанной температуры обеспечивает индукционная установка с высокочастотным нагревом материала или устройство с пламенным нагревом материала при сгорании пропан-бутана в кислороде. Использование устройства второго вида в производственных условиях более предпочтительно. Восстановление структуры и ударной вязкости материала объясняется укрупнением зерен, растворением карбидов, образовавшихся по их границам зерен, и закруглением вершин игл видманштеттовой структуры, образовавшейся в начале жизненного цикла трубопроводов при сварке их стыков.

Предложенная технология восстановительного ремонта линейной части магистральных трубопроводов позволяет повысить примерно в два раза ударную вязкость их материала, приблизив ее к начальному значению параметра при вводе объекта в эксплуатацию.

**Заключение.** Выявлены эксплуатационные повреждения оборудования нефтехимического комплекса, касающиеся магистральных нефтегазопроводов, с выделение устранимых (тепловая хрупкость и сфероидизация перлита) и неустраняемых (межкристаллитная коррозия, сероводородное расслоение и коррозионное растрескивание под напряжением в виде трещин) повреждений. С допустимой толщиной стенок, пораженных коррозией, эксплуатация трубопровода может быть продлена. Минимальную толщину стенок устанавливают нормативные документы.

<sup>3</sup> Горичкий, В.М. Учет охрупчивания конструкционных материалов в процессе эксплуатации и дефектности при определении остаточного ресурса ответственного оборудования / В.М. Горичкий // Новые методы технического диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса конструкций и оборудования, работающего под давлением : материалы совещания – Новополоцк, 1997. – С 27–30.

<sup>4</sup> Способ восстановления ударной вязкости кольцевого сварного соединения магистрального трубопровода : пат. МТ ВУ, МПК С21D 9/50, С21D 9/08, С21D 9/14, В23Р 6/00 / А.С. Снарский, А.Н. Янушонок. – Оpubл. 30.08.2014.

Обосновано использование ударной вязкости материала конструкций в качестве основного свойства среди других механических свойств. Она характеризует склонность материала к хрупкому разрушению и обладает высокой чувствительностью к эксплуатационной деградации как основного металла, так и материала сварных соединений.

Предложена технология восстановительного ремонта линейной части магистральных трубопроводов, позволяющая повысить примерно в два раза ударную вязкость их материала с продлением срока службы трубопровода до следующего диагностирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В.П. Обеспечение безопасной работы оборудования нефтехимического комплекса / В.П. Иванов, А.В. Крыленко. – Новополоцк : ПГУ, 2015. – 180 с.
2. Бондаренко, В.А. Использование нестандартных методов для контроля механических свойств углеродистой стали / В.А. Бондаренко, Р.Г. Айсин, В.В. Третьяков // Завод. лаборатория. – 1974. – № 5 (Т. 40). – С. 601–603.
3. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1978. – 648 с.

## REFERENCES

1. Ivanov, V.P. & Krylenko, A.V. (2015). *Obespecheniye bezopasnoy raboty oborudovaniya neftekhimicheskogo kompleksa* [Ensuring the safe operation of equipment for the petrochemical complex]. Novopolotsk: PGU. (In Russ.).
2. Bondarenko, V.A., Aysin, R.G. & Tret'yakov, V.V. (1974). *Ispol'zovaniye nestandartnykh metodov dlya kontrolya mekhanicheskikh svoystv uglevodistoy stali* [Use of non-standard methods to control the mechanical properties of carbon steel]. *Zavodskaya laboratoriya* [Factory laboratory], 5 (T. 40), 601–603. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Gulyayev, A.P. (1978). *Metallovedeniye* [Metal science]. Moscow: Metallurgiya. (In Russ.).

Поступила 04.07.2022

## EVALUATION AND USE OF RESIDUAL RESOURCE EQUIPMENT FOR A PETROCHEMICAL COMPLEX

V. IVANOV, A. KUL'BEY, A. BONDAREV

*The damage to the equipment of the petrochemical complex, related to the main oil and gas pipelines, was established, with the identification of removable and irreparable damage. Operation of a pipeline with walls affected by general corrosion can be extended if their thickness is within the permissible limits established by regulatory documents. The impact strength of a material of structures can be used as the main property among other mechanical properties in assessing the tendency of a material to brittle fracture. It is highly sensitive to operational degradation of both the base metal and the material of the welded joints. The technology of restoration repair of the linear part of main pipelines has been proposed, which makes it possible to approximately double the impact toughness of their material with an extension of the service life of the pipeline until the next diagnosis.*

**Keywords:** *equipment of the petrochemical complex, main pipelines, damage, residual life, restoration.*