

УДК 620.193:620.197.2/.6

АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ЗОНАХ ЛОКАЛЬНОГО КАТАСТРОФИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Муравьев В.И., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник (vmuravyev@mail.ru)

Лончаков С.З., к.т.н., профессор, старший научный сотрудник

Пицык В.С., аспирант

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

(681013, Россия, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

Аннотация. Установлено, что самым опасным типом коррозии трубопроводных систем переработки нефтепродуктов (ТСПН) является питтинговая. На основании объемной толщинометрии и результатов замеров коэрцитивной силы установлен механизм локального катастрофического коррозионного разрушения ТСПН. Предложен метод неразрушающего контроля качества сварки и последующей термической обработки ТСПН, который позволит предотвратить аварийные ситуации.

Ключевые слова: коррозия, микро- и макроструктура, кавитация, толщинометрия, коэрцитивная сила, сульфидные отложения.

В настоящее время до 40 % аварий на трубопроводных системах переработки нефтепродуктов (ТСПН) связано с коррозионными разрушениями. Из анализа многообразия локальных видов разрушения материалов можно сделать вывод, что в агрессивных жидкостях повреждения происходят особенно быстро в результате двойного воздействия: кавитационной эрозии и коррозии. Эрозия разрушает поверхность металла и способствует удалению с нее защитной оксидной пленки, создавая тем самым идеальные условия для нее. До настоящего времени нет единого мнения о механизмах локального разрушения трубопроводных систем в процессе переработки нефтепродуктов, а следовательно, и единого мнения о методах устранения причин данного явления, поэтому материаловедческое обоснование и исследование эволюции структурных изменений локального разрушения и создания единой структуры трубных заготовок, обеспечивающих их надежность – актуальная задача современной нефтеперерабатывающей промышленности.

В качестве образцов использовали вырезки из ТСПН из различных материалов, в частности Ст3, Ст20 и стали марки 15Х5Н.

Шлифы для металлографических исследований изготавливали по общепринятой технологии последовательного шлифования и полирования. Для вырезки образцов использовали настольный абразивный отрезной станок марки Delta AbrasiMet (Германия). Шлифование и полирование образцов проводили при помощи шлифовально-полировального станка марки EcoMet 250 (Германия) с полуавтоматической насадкой AutoMet 250 (Германия). Микроструктуру исследовали на металлографическом электронном микроскопе «Микро-200» (Россия) в диапазоне увеличений от 100 до 1000 крат. Оцифрованные изображения в дальнейшем обрабатывали с использованием специализированной программы Image.Pro.Plus.5.1.

Толщинометрию проводили на портативном ультразвуковом толщиномере марки PANAMETRICS 26GM компании Olympus NDT (США). В качестве фиксирующего устройства использовали датчик D799, производимый той же компанией. Толщинометрию осуществляли методом сплошного сканирования.

Химический состав металла образцов исследовали методом спектрального анализа на оптическом эмиссионном анализаторе Q4 TASMAN фирмы BRUKER (Германия) для определения легирующих и примесных элементов. Химический состав сульфидных покрытий определяли на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S3400N (Япония). На рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном анализаторе NEXT CJ компании RIGAKU (Япония) осуществляли комплексный анализ химического состава образцов.

Замеры коэрцитивной силы проводили цифровым полуавтоматическим коэрцитиметром КРМ-Ц (Россия), который позволяет прогнозировать механические и некоторые физические свойства ферромагнитных материалов, прочностные и пластические свойства деталей и конструкций. Измерение коэрцитивной силы осуществляли в соответствии с методикой, изложенной в работе [1].

В химической промышленности, как показал анализ причин выхода из строя оборудования [2], локальные виды коррозии вносят основной вклад в разрушение материалов (рис. 1).

Сталь подвергается всем видам коррозии, но в большей степени наблюдается общая и питтинговая коррозия. Развитие питтинга в среде нефтепродуктов возможно только в присутствии электролита и механических примесей и зависит от химического состава горючего. Анализ эксплуатационного ресурса ТСПН ЭЛОУ-АВТ-2, -3 показал, что для трубопроводных систем в одних и тех же условиях он составляет 40 лет, но

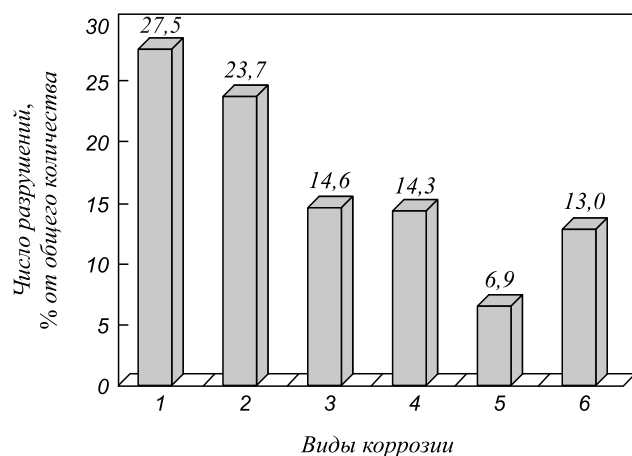


Рис. 1. Гистограмма результатов обследования случаев выхода из строя оборудования переработки нефтепродуктов (685 случаев):

- 1 – общая коррозия; 2 – коррозионное растрескивание;
3 – межкристаллитная коррозия; 4 – питтинговая коррозия;
5 – коррозионная эрозия; 6 – прочие виды коррозии

отдельные элементы достигают предельных допустимых величин менее, чем через пять лет, а в некоторых случаях и нескольких месяцев. Это, как правило, зоны врезок, радиусы переходов, сварные швы и прилегающие к ним участки [3 – 5].

Коррозионное разрушение характеризуется локальностью на входном и выходном патрубках прохождения головного отводного продукта и отвода печного змеевика. Локальное неравномерное разрушение наблюдается и в самих пораженных коррозией участках. Неравномерное коррозионное разрушение в виде сферических лунок, образующих цепочки, распространяется в направлении движения рабочей жидкости. Сферические лунки различны по размерам и глубине и могут быть как поверхностными, так и сквозными, последние являются зародышами образования трещин. Параметры коррозионного разрушения (диаметр сферической лунки (D) и толщина стенки (h)) выходного патрубка в различных зонах приведены ниже:

Секция	D , мм	h , мм
1	0,65 – 17,60	3,60 – 6,40
	5,20	4,15
2	1,60 – 12,80	2,40 – 6,40
	5,90	4,45
3	1,60 – 15,20	1,20 – 4,80
	6,10	3,00
4	1,20 – 15,2	1,45 – 4,00
	6,30	2,50

Примечание. В числителе указан интервал разброса значений, в знаменателе – среднеарифметическое значение.

Результаты ультразвуковой толщинометрии методом сплошного сканирования (рис. 2) по трем сечениям отвода показали, что в сечении I толщина остается практически одинаковой (на уровне 10 мм) во всех точ-

ках, а в местах турбулизации потока на радиусе изгиба (сечения II и III) наблюдается интенсивный местный коррозионный износ. Объемный характер распределения глубины поражений в развертке трубы свидетельствует о локализации поражений в определенной зоне (рис. 2, б). На внутренней поверхности исследуемых образцов имеются черные отложения, характерные для сульфида металла. Толщина пленки незначительна; пленка хорошо сцеплена с основным металлом и не имеет рыхлости.

Исходя из теоретических основ коррозии [6] структурную деградацию в локальных зонах можно отнести к активной стадии коррозионного разрушения, причем в завершающей катастрофической стадии коррозионного разрушения. Как видно (рис. 3, а), темный оттенок микроструктуры является результатом травления точечных объектов с более высоким химическим потенциалом, представляющих концентраторы напряжений нано- и микромасштабного уровня, типичных для диффузионного процесса. Возможными диффузантами могут быть атомарный кислород и водород, сера и ионы различных низкомолекулярных соединений. Скелетированное преобразование структуры поверхностного слоя позволяет выявить границы раздела (рис. 3, б). Количественная оценка степени деградации микроструктуры по плотности границ зерен, рассчитанная в программе Image.Pro.Plus.5.1 позволила установить глубину охвата коррозии 50 – 65 мкм [3 – 5].

В табл. 1 представлено изменение химического состава в зоне деградации по сечению трубопровода. По результатам химического рентгеноструктурного анализа (табл. 2) установлено, что отложения представляют собой продукты сульфидной коррозии металла (прежде всего железа), остатки соединений серы, большая часть которых разложилась вследствие гидролиза и окисления кислородом воздуха в процессе хранения образцов; кокс; примеси нерастворимых в кислотах механических загрязнений. Из рассмотренных данных следует, что железо-сульфидная составляющая является непосредственным продуктом коррозионных реакций.

Во влажных сероводородных средах создаются условия для наводороживания металла. Все стали с ферритной, феррито-перлитной, бейнитной и мартенситной структурами могут подвергаться водородному охрупчиванию. Особенно активно это происходит при наличии так называемого легкоподвижного (диффузионного) водорода. Водород снижает силы взаимного притяжения атомов железа в кристаллической решетке, создает высокие давления при мольризации в микропорах и микротрещинах, что вызывает разрушение металла. Присутствие в составе продуктов коррозии сернистых соединений (табл. 1 и 2) свидетельствует об участии сероводорода в коррозионном процессе, то есть высокотемпературной сероводородной коррозии.

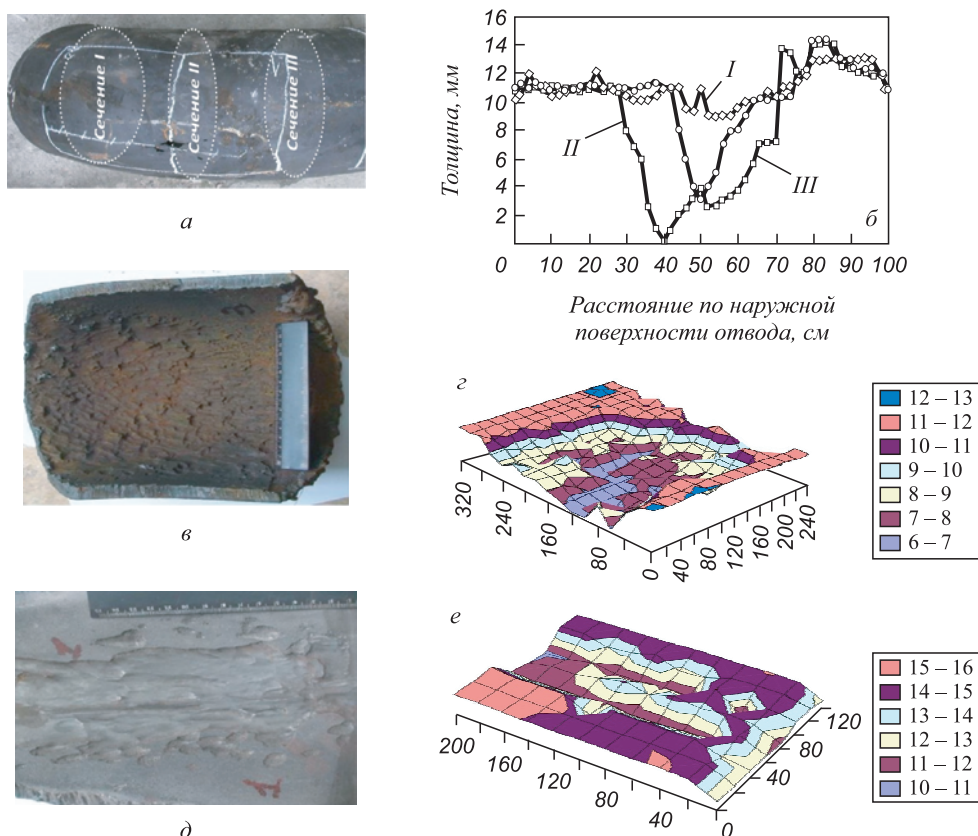


Рис. 2. Внешний вид отвода и профилограммы распределения глубины поражений в результате коррозионного воздействия: а – внешний вид отвода, сечений и сегментов измерения глубины поражений; б – линейная профилограмма глубины поражений отвода по окружности в сечениях I, II, III; в и д – внешний вид внутренней поверхности отвода по внешнему радиусу сегмента I и 2; з и е – развертка объемной профилограммы глубины поражения отвода по внешнему радиусу в сегменте I и 2

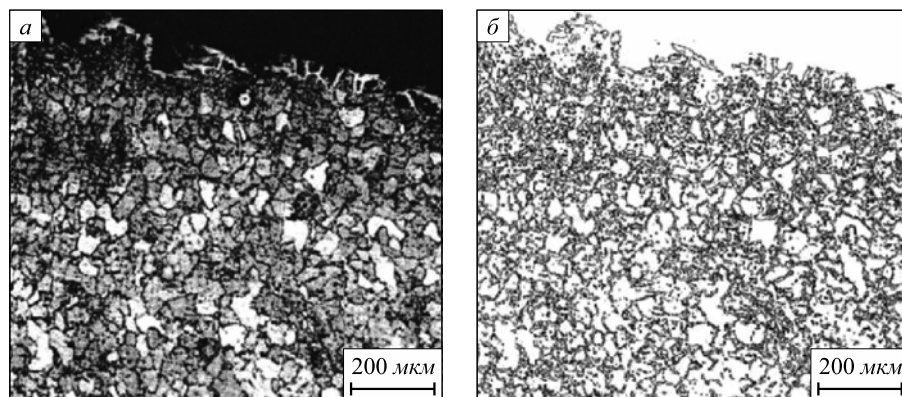


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя трубопровода из Ст20, подверженного коррозионному процессу (а) и ее «скелетированное» преобразование (б)

Как известно, под действием вакуума температура кипения всех фракций мазута значительно снижается, в объеме потока мазута начинается интенсивное парообразование с образованием парожидкостной смеси, плотность и вязкость которой отличаются от показателей мазута. Это ведет к увеличению скорости потока и в конечном итоге к увеличению коррозионного износа. Таким образом, высокие скорости движения парожидкостного потока в зонах конструктивных элементов, создающих гидравлические условия для развития мест-

ных турбулентных жидкостных потоков и завихрения, вызывают разрушение защитных сульфидных пленок и кавитационно-эрозионное повреждение ТСПН.

Организация мониторинга как в процессе выбора и обоснования материала для ТСПН, так и в процессе их эксплуатации с целью контроля за факторами, оказывающими агрессивное воздействие на металл, имеет важнейшее значение по предотвращению аварийных ситуаций. Замеры коэрцитивной силы сварных соединений контрольных образцов из Ст20 проводили

Т а б л и ц а 1

Изменение химического состава в зоне деградации по сечению трубопровода

Материал	Зона	Содержание, %, элементов								
		C	Si	S	Cr	Mo	Mn	Ni	Cu	Fe
15X5M	коксовые отложения	–	0,615	13,500	0,467	–	0,297	0,479	1,200	80,70
	после удаления отложения	–	0,280	2,500	0,365	–	0,348	0,279	0,615	95,70
	основной металл	0,102	0,319	0,0098	5,230	0,445	0,290	0,358	0,158	92,69
Ст20	коксовые отложения	2,320	0,710	3,840	1,190	–	0,740	0,80	1,870	63,85
	после удаления отложения	1,190	0,350	1,233	0,690	–	0,870	0,57	0,920	0,93
	основной металл	0,260	0,250	0,033	0,120	–	0,390	0,12	0,220	98,29

Т а б л и ц а 2

Результаты химического анализа отложений

Показатель	Образцы печного змеевика	Образцы отвода трубопровода
Общая сера в исходном отложении, % (по массе)	2,19 – 2,39	2,5 – 3,9
Остаток после прокаливании, % (по массе)	89,0	56,4
Железо, % (по массе)	54,88	23,17
Остаток после промывки ацетоном, % (по массе)	–	66,4
Общая сера в промытом ацетоном остатке, % (по массе)	–	5,96 – 5,99
Сульфид-ион	присутствует	присутствует

по периметру шва (рис. 4, а). Нестабильности не обнаружено, значения укладываются в нормы допуска. Замеры коэрцитивной силы по поверхности трубных элементов из материала 15X5M проводили на контрольных образцах и на трубных элементах технологических трубопроводов, смонтированных на установке замедленного коксования ООО «РН-Комсомольский НПЗ», направление измерения – вдоль оси трубы. Нестабильности (рис. 4, б) не обнаружено, значения также укладываются в нормы допуска в соответствии с технической документацией на изготовление трубопроводов. Использование датчиков постоянного непрерывного контроля толщины стенки переходников и патрубков ТСПН позволит на ранних стадиях выявлять зоны коррозионного повреждения критической величины и предотвращать аварийные ситуации.

Выводы. Из аналитической оценки дефектов и разрушений трубопроводных систем переработки нефтепродуктов следует, что самым опасным типом коррозии является питтинговая (точечная) коррозия. В большей степени такой коррозии подвержены зоны врезок, радиусы переходов, сварные швы и прилегающие к ним участки. Локальные участки коррозионного разрушения характеризуются неравномерным распре-

делением вдоль оси патрубков вытянутых лунок диам. 5 – 7 мм и глубиной 0,1 – 2,0 мм, образующих вытянутые бороздки. Профилограммы толщины стенки, полученные методом ультразвукового сканирования с наружной стороны трубы, показали объемный характер распределения глубины поражений в развертке трубы и свидетельствуют о локализации поражений в определенных местах турбулизации потока на радиусе изгиба. Исследованиями макроструктуры и электронной фрактографией установлено наличие на внутренней поверхности змеевика плотных сплошных черных отложений продуктов коррозии, претерпевающих разрушение целыми конгломератами в локальных зонах катастрофической коррозии. Скелетированное преобразование микроструктуры с темным оттенком, типичным для диффузионного и упрочненного поверхностного слоя, позволило количественно оценить степень деградации микроструктуры по плотности границ зерен и глубину охвата коррозии 50 – 65 мкм. Методами масспектрального и рентгеновского электронномикроскопического анализов определен химический состав локальных микроучастков катастрофического разрушения; установлено, что отложения представляют собой продукты сульфидной коррозии

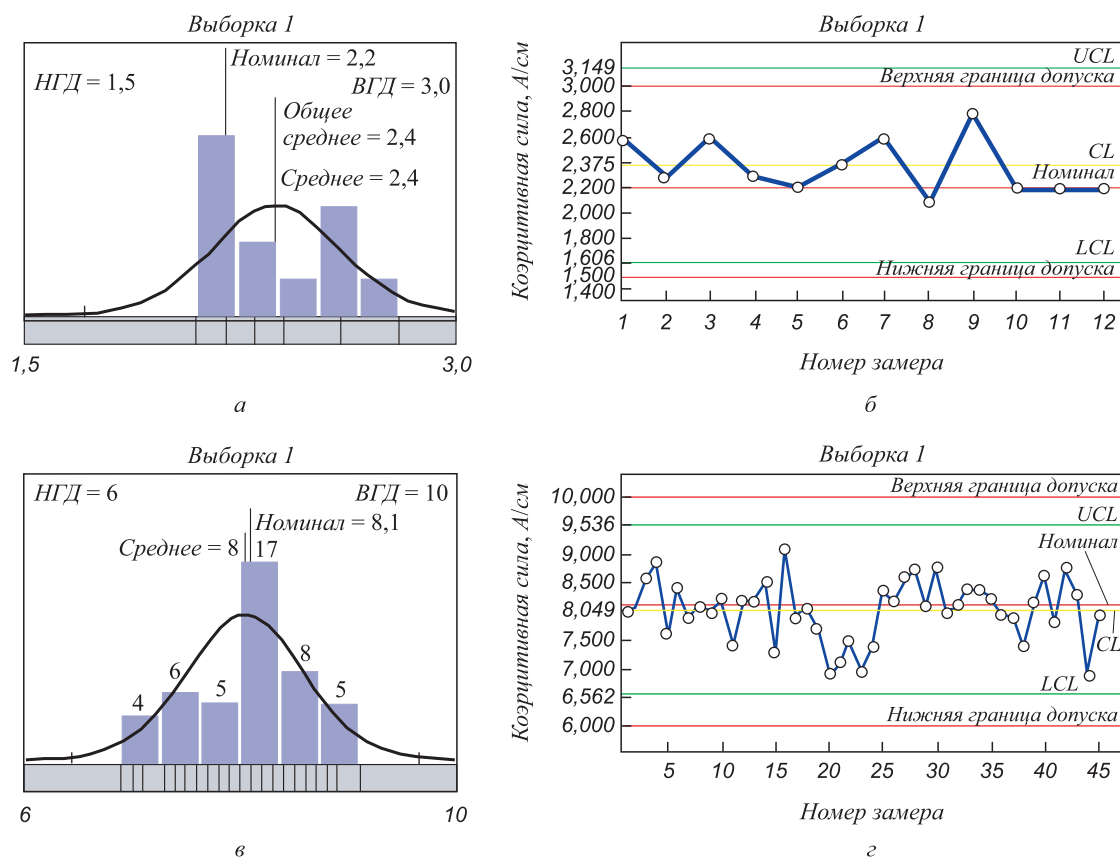


Рис. 4. Результаты замеров коэрцитивной силы образцов из стали Ст20 (типоразмер диам. 102×4, поверхность сварного шва) (а, б) и образцов из стали 15Х5М (типоразмер диам. 102×12, поверхность основного металла) (в, г): а, в – гистограммы; б, г – контрольные карты

металла, причем содержание серы в коксовых отложениях составляет более 13 %, в оксидной пленке 1,5 – 3,5 %. Установлено повышенное содержание подвижного водорода в металле. Определен механизм локального катастрофического коррозионного разрушения ТСПН. Турбулизация потоков вакуумного газойля и мазута, прямоочного бензина в зонах конструктивных элементов, вызванная гидравлическими условиями, приводит к кавитационно-эрозионному разрушению из-за низких демпфирующих свойств сульфидной пленки с коксовыми отложениями в последующем высокотемпературном сероводородном охрупчивании металла ТСПН. Предложен метод неразрушающего контроля объемной ультразвуковой толщинометрией, а также метод неразрушающего контроля качества сварных швов и последующей термической обработки ТСПН путем определения коэрцитивной силы, которые в сочетании с традиционными методами контроля механических свойств позволяют определять напряженно-деформационное состояние,

остаточный эксплуатационный ресурс ТСПН, а также выявлять кавитационно-эрозионные разрушения, что позволяет предотвратить аварийные ситуации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукьянов С.И., Бутин А.В., Евстигнеев А.А. и др. // Контроль и диагностика. 2010. № 10. С. 30 – 33.
2. Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. – М.: Металлургия, 1985. – 88 с.
3. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Фролов А.В. и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. № 9. С. 42 – 46.
4. Муравьев В.И., Евстигнеев А.А., Бахматов П.В., Бутин А.В. // Ученые записки «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета». 2011. № IV-1 (8). С. 58 – 70.
5. Ким В.А., Муравьев В.И., Лукьянов С.И., Бутин А.В. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. № 11. С. 35 – 38.
6. Улинг Г.Г., Ревы Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Пер. с англ.; под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.

© 2014 г. Муравьев В.И., Лончаков С.З., Пицк В.С.
Поступила 24 декабря 2013 г.

ANALYSIS OF STRUCTURAL CHANGES IN THE ZONES OF LOCAL CATASTROPHIC DESTRUCTION OF PIPELINE SYSTEMS OF OIL REFINING

Murav'ev V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher
(vmuravyev@mail.ru)

Lonchakov S.Z., Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

Pitsyk V.S., Postgraduate

Komsomolsk-on-Amur State Technical University (27, pr. Lenina,
Komsomolsk-on-Amur, 681031, Russia)

Abstract. It has been found that the most dangerous corrosion type of pipeline systems of oil refining is a pitting one. Based on the volume and thickness measurements, as well as the results of the coercive force measurements, the mechanism of local catastrophic corrosion of pipeline systems of oil refining has been established. A method of non-destructive quality control of welding and subsequent heat treatment of pipeline systems of oil refining has been offered. It will prevent the emergency situations.

Keywords: corrosion, micro- and macro-structure, cavitation, thickness measurements, coercive force, sulfide deposits.

REFERENCES

1. Luk'yanov S.I., Butin A.V., Evstigneev A.A., Murav'ev V.I., Kim V.A. Magnetic identification of the material microstruc-

ture. *Kontrol' i diagnostika*. 2010, no. 10, pp. 30–33. (In Russ.).

2. Kolotyarkin Ya.M. *Metall i korroziya* [Metal and corrosion]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 88 p. (In Russ.).
3. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Frolov A.V., Evstigneev A.A., Butin A.V. The impact of structural changes of metal pipes for damage to pipeline systems for petroleum refining. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2011, no. 9, pp. 42–46. (In Russ.).
4. Murav'ev V.I., Evstigneev A.A., Bahmatov P.V., Butin A.V. Analytical evaluation and development of methods to improve the corrosion resistance of structural steels TSPN. *Uchenye zapiski «Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta»*. 2011, no. IV-1 (8), pp. 58–70. (In Russ.).
5. Kim V.A., Murav'ev V.I., Luk'yanov S.I., Butin A.V. Corrosion processes and the resource of technological pipelines of ELOU-AVT-3. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2012, no. 11, pp. 35–38. (In Russ.).
6. Uling G.G., Revi R.U. *Korroziya i bor'ba s nei. Vvedenie v korroziionnuyu nauku i tekhniku* [Corrosion and the fight against it. Introduction to corrosion science and technology]. Sukhotina A.M. ed. Leningrad: Khimiya, 1989. 456 p. (In Russ.).

Received December 24, 2013

УДК 621.791.05:620.179

МИКРОСТРУКТУРА, ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ И АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛА РАЗРУШЕННОГО РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ*

Смирнов А.Н.¹, д.т.н., профессор (galvas.kem@gmail.com)

Абабков Н.В.¹, к.т.н., доцент

Козлов Э.В.², д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой

Конева Н.А.², д.ф.-м.н., профессор

Быкова Н.В.¹, инженер научно-инновационного управления

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева
(Россия, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28)

² Томский государственный архитектурно-строительный университет
(Россия, 634003, Томск, пл. Соляная, 2)

Аннотация. Проведено исследование металла фрагмента разрушенного ротора паровой турбины разрушающими и неразрушающими методами контроля для выявления причин разрушений и для предотвращения в будущем подобных случаев. Исследовано структурное состояние металла разрушенного ротора с применением методов электронной микроскопии. Установлена взаимосвязь акустических характеристик и параметров микроструктуры металла разрушенного ротора.

Ключевые слова: ротор паровой турбины, микроструктура, микротрещины, диагностика.

В настоящее время в России более 80 % (в энергетике более 90 %) промышленного оборудования отра-

ботало свой расчетный срок. Разрушения технических устройств или их элементов могут привести и приводят

* Авторы признательны сотрудникам кафедры физики ТГАСУ Н.А. Поповой, М.В. Федорищевой, Н.Р. Сизоненко, Е.Л. Никоненко и М.П. Каляшникову за участие в проведении исследований, а также Б.Р. Fensterу (ООО «Энергопром – М») за участие в постановочных экспериментах.