

DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-6-110-118
УДК 622.692.4:620.193

А.Е. Зорин (ООО «ЭКСИКОМ», г. Москва, Российская Федерация),
А.Э. Толстов (ООО «Газприбортехнология», г. Москва, Российская Федерация)

ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕЗИСА ОБРАЗОВАНИЯ РАССЛОЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ ТРУБ: ВЛИЯНИЕ НА ОПАСНОСТЬ ДАННЫХ ДЕФЕКТОВ И СПОСОБЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Aleksandr E. Zorin (EKSIKOM LLC, Moscow, Russian Federation),
Anatoliy E. Tolstov (Gazpribortekhnologiya LLC, Moscow, Russian Federation)

THE GENESIS OF BUNDLES IN METAL PIPES: INFLUENCE ON DANGER OF THESE DEFECTS AND METHODS OF IDENTIFICATION

Введение

Для рационального планирования и выполнения ремонтных работ в настоящее время принято руководствоваться принципом обслуживания объектов по техническому состоянию. Данный принцип давно используется при эксплуатации нефтегазопроводов, однако анализ реализуемых при этом подходов показывает, что зачастую он соблюдается лишь формально. Наиболее явно это можно проследить на примере расслоений металла труб. Такие дефекты являются достаточно распространенными, однако существующие нормы оценки качества труб, по сути, не признают их представляющими реальную угрозу для несущей способности трубопровода, по крайней мере, если расслоения являются плоскими. Анализ существующих исследований генезиса образования расслоений металла показывает, что в настоящее время принято выделять два типа подобных дефектов: металлургические и водородные. Для расширения указанных представлений было выдвинуто предположение о влиянии на образование расслоений процесса старения металла.

Background

For the rational planning and execution of repair work, it is accepted to be guided by the principle of objects servicing according to their technical condition. This principle has been used in the operation of oil and gas pipelines, however, an analysis of the approaches implemented in this case shows that it is often only formally observed. It can be clearly seen in the example of the bundles of metal pipes. Such defects are fairly common, but the existing standards for assessing the quality of pipes, in fact, do not recognize them as representing a real threat to the carrying capacity of the pipeline, at least if the stratification is flat. An analysis of existing studies of the genesis of the formation of metal bundles shows that at present it is customary to distinguish two types of similar defects: metallurgical and hydrogen. To extend these ideas, an assumption was made about the effect on the formation of stratification of the aging process of the metal.

From a theoretical point of view, this is justified by the fact that aging, characterized by the segregation of carbides along grain boundaries, leads to metal embrittlement, which increases the likelihood of stratification.

С теоретической точки зрения это обосновывается тем, что старение, характеризующееся сегрегацией карбидов по границам зерен, приводит к охрупчиванию металла, что увеличивает вероятность возникновения расслоений.

Цели и задачи

Установление причин образования расслоений и их влияния на опасность данных дефектов.

Методы

Выполнялась оптическая (микроскоп NIKON MA200) и электронная (микроскоп Jeol JEM-200CX) микроскопия различных зон металла, стандартные механические испытания исследуемых темплетов (копер InstronSI-1M, испытательная машина SHIMADZU EHF-EV200K2-040-1A), рентгеновская спектроскопия зон расслоения (спектрометр JEOLJPS-9010MX).

Результаты

Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований фрагментов труб, содержащих расслоения. Установлено, что помимо известных типов расслоений, вызванных металлургической ликвацией и водородным охрупчиванием, существует третий - обусловленный протеканием в металле процесса старения, который наряду с водородным типом расслоений характеризуется падением эксплуатационных характеристик металла дефектной зоны. Также была оценена возможность неразрушающей идентификации различных типов расслоений.

Aims and Objectives

Establishing the causes of bundles formation and their effect on the risk of these defects.

Methods

Optical (microscope NIKON MA200) and electron microscope (Jeol JEM-200CX microscope) microscopy of various metal zones, standard mechanical tests of the templates being studied (InstronSI-1M coper, SHIMADZU EHF-EV200K2-040-1A X-ray spectroscopy of splitting zones (spectrometer JEOLJPS-9010MX).

Results

The article presents the results of complex experimental researches of pipe fragments with bundles. It is established that besides to the known types of bundles, caused by metallurgical liquation and hydrogen embrittlement, there is another one - caused by the aging process in metal, which, as the hydrogen type of bundles, leads to drop the performance properties of metal in the defective zone. Also was evaluated the possibility to identify of different types of bundles by non-destructive methods.

Ключевые слова: расслоения металла, поврежденность металла, старение металла, водородное охрупчивание, твердость, микротвердость, неразрушающая оценка состояния металла, работоспособность трубопроводов

Key words: bundles of metal, damage of metal, aging of the metal, hydrogen embrittlement, hardness, microhardness, non-destructive evaluation of metal state, pipelines efficiency

Для рационального планирования и выполнения ремонтных работ в настоящее время принято руководствоваться принципом обслуживания объектов по техническому состоянию.

Данный принцип давно используется при эксплуатации нефтегазопроводов, однако анализ реализуемых при этом подходов показывает, что зачастую он соблюдается лишь формально.

Наиболее явно это можно проследить на примере расслоений металла труб. Такие дефекты являются достаточно распространенными, однако существующие нормы оценки качества труб, по сути, не признают их представляющими реальную угрозу для несущей способности трубопровода, по крайней мере, если расслоения являются плоскими [1-3].

Данная ситуация обусловлена укоренившимся подходом к исследованию дефектов, рассматривающим их в качестве концентраторов напряжений от действия рабочего давления в трубопроводе. С этой позиции расслоения действительно не представляют опасности при осевой ориентации. Однако такой подход не имеет должного обоснования. Реальные условия эксплуатации нефтегазопроводов характеризуются воздействием на них широкого спектра дополнительных нагрузок, связанных проектным положением и его изменением в процессе службы. Кроме того, расслоения могут иметь различную природу, которая по-разному сказывается на их опасности.

Так, в частности, анализ существующих исследований генезиса образования расслоений металла показывает, что в настоящее время принято выделять два типа подобных дефектов: металлургические и водородные [4-6]. Появление металлургических расслоений связано с внутренней неоднородностью стали, которая обусловлена рядом физико-химических явлений, протекающих в металле при его производстве и изготовлении трубы. Водородное расслоение является частным случаем процесса водородного охрупчивания металла.

Для расширения указанных представлений было выдвинуто предположение о влиянии на образование расслоений процесса старения металла. С теоретической точки зрения это обосновывается тем, что старение, характеризующееся сегрегацией карбидов по границам зерен, приводит к охрупчиванию металла, что увеличивает вероятность возникновения расслоений.

С целью подтверждения данного предположения из шести различных участков га-

зопроводов были вырезаны темплеты металла, содержащие расслоения. Также подбирались темплеты из тех же участков, не содержащие подобных дефектов, либо из труб аварийного запаса аналогичной стали и типоразмера (таблица 1).

Исследования представленных в таблице 1 образцов выполнялись в разное время, в рамках различных организационных мероприятий (расследования причин аварийных разрушений, экспертиза промышленной безопасности участков газопроводов, выведенных в капитальный ремонт, собственные исследования авторов и т.д.), поэтому состав выполняемых работ в каждом случае несколько различался.

Для установления причин образования расслоений и их влияния на опасность данных дефектов выполнялась оптическая (микроскоп NIKON MA200) и электронная (микроскоп Jeol JEM-200CX) микроскопия различных зон металла, стандартные механические испытания исследуемых темплетов (копер InstronSI-1M, испытательная машина SHIMADZU EHF-EV200K2-040-1A), рентгеновская спектроскопия зон расслоения (спектрометр JEOLJPS-9010MX).

Кроме того, выполнялось изучение возможности неразрушающей идентификации природы расслоений, для чего использовались методы измерения твердости и микротвердости. Переносные твердомеры являются достаточно распространенными средствами диагностики, а для получения значений микротвердости может использоваться диагностический комплекс, рассмотренный в работе [7].

В рамках представленной работы применение указанных методов все же выполнялось в лабораторных условиях на стационарных твердомере KB Pruftechnik 750 и микротвердомере Shimadzu HMV-G21DT для повышения достоверности получаемых результатов, которые, однако, могут быть корректно экстраполированы и для случая выполнения измерений в трассовых условиях.

Измерение твердости и микротвердости выполнялось на поверхности всех подготовленных к исследованиям образцов.

Таблица 1. Объекты исследований

№ п/п	Наименование участка вырезки образцов, зона вырезки, основные характеристики	Обозначение темплета с расслоением	Обозначение бездефектного темплета
1	Отвод холодного гнущего с участка МГ Уренгой - Новопсков, Ду 1400 мм, толщиной стенки 17,5 мм. Материал - сталь 09Г2ФБ Харцызского трубопрокатного завода по ТУ 14-3-741-78.	УН-Р	УН-БД
2	Отвод холодного гнущего с участка МГ Петровск - Новопсков, Ду 1200 мм, толщиной стенки 12,0 мм. Материал - сталь 17Г1С Челябинского трубного завода по ТУ 14-3-109-73.	ПН-Р	17Г1С-А3*
3	Зона разрушения трубы при пневматических испытаниях МГ Оренбург -Новопсков, Ду 1200 мм, толщиной стенки 14,1 мм. Материал - сталь класса прочности К60, производство Италия по ТУ 48.74.	ОН-Р-1	ОН-БД
4	Зона излома после проведения полигонных испытаний плети, сваренной из трубы с участка МГ Оренбург - Новопсков, Ду 1200 мм, толщиной стенки 14,1 мм. Материал - сталь класса прочности К60, производство Италия по ТУ 48.74.	ОН-Р-2	
5	Труба с участка МГ «САЦ-4-2», Ду 1200 мм, толщиной стенки 12,0 мм. Материал - сталь 13ГС по ТУ 14-3-1698-2000.	САЦ4-Р	САЦ4-БД
6	Зона разрушения трубы на участке МГ «САЦ-3», Ду 1200 мм, толщиной стенки 12,0 мм. Материал - сталь 17Г1С Челябинского трубного завода по ТУ 14-3-109-73.	САЦ3-Р	17Г1С-А3*
* Образцы вырезаны из трубы Ду 1200 мм, толщиной стенки 12,0 мм, стали 17Г1С Челябинского трубного завода по ТУ 14-3-109-73, находящейся в аварийном запасе.			

Значения твердости получали в трех зонах каждого образца, а в каждой зоне выполнялось по 5 индентирований с усилием в 10 кгс, после чего они обрабатывались для вычисления среднего значения по каждой зоне.

Для измерения микротвердости использовался способ, изложенный в работе [8]. Выборка значений микротвердости (по 100 измерений) выполнялась в двух локальных зонах поверхности в рамках дефектной зоны, содержащей расслоение, а также в трех локальных зонах на соответствующих образцах в исходном (бездефектном) состоянии для получения базового распределения. Каждое

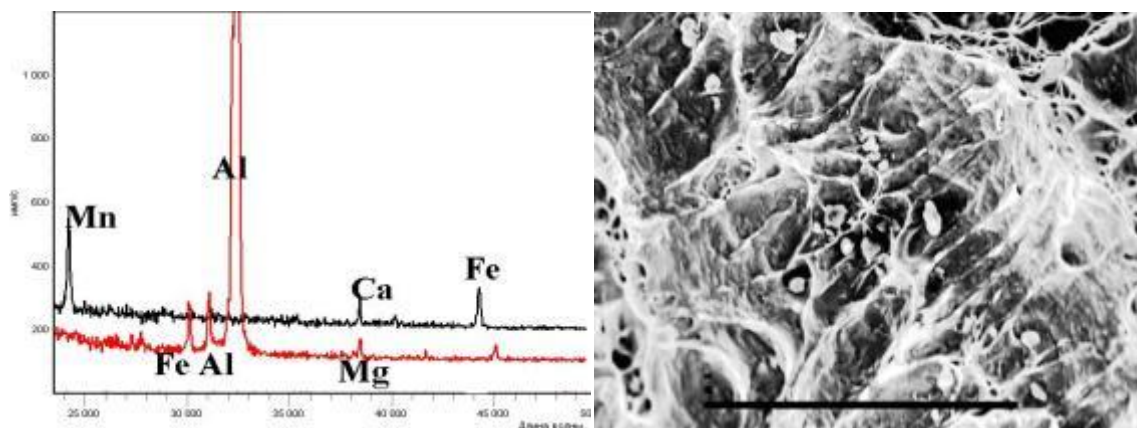
из распределений микротвердости, полученное в зоне дефекта, сопоставлялось с базовым распределением, вычисленным путем суммирования результатов по трем точкам. Во всех случаях нагрузка на индентор выбиралась равной 10 гс.

Результаты исследования генезиса расслоений показали, что в двух случаях (образцы УН-Р и САЦ3-Р) причина образования расслоений была чисто металлургическая - концентрация в центральной по толщине части трубы неметаллических включений, прежде всего оксида алюминия (рисунок 1). В одном случае (образец САЦ4-Р) расслоение появилось в результате водородного охруп-

чивания. Одним из характерных признаков такого расслоения является образование выпучивания трубы в зоне дефекта (рисунок 2). И сразу в трех случаях (образцы ПН-Р, ОН-Р-1 и ОН-Р-2) причиной образования расслоений явилось протекание процесса старения, что было установлено по обнаруженным карбидным выделениям на границах зерен

металла как в зоне расслоений, так и на поверхности (рисунок 3).

Подтвердив сделанное предположение о влиянии процесса старения на образование расслоений в трубах, следующей поставленной задачей являлась оценка влияния природы расслоения на опасность данных дефектов.

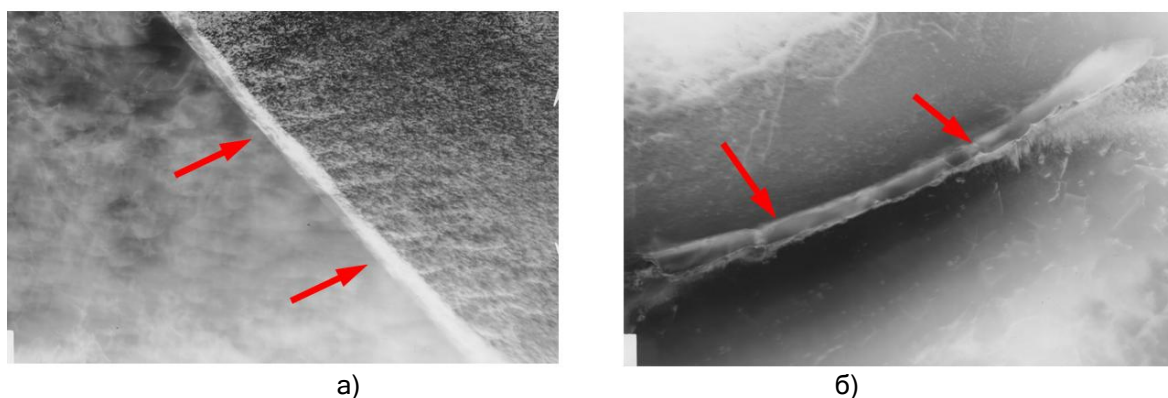


а) участки рентгеновского спектра постороннего неметаллического включения;
б) посторонние включения на отрыве металла

Рисунок 1. Неметаллические включения в зоне расслоения образца УН-Р



Рисунок 2. Расслоение водородного типа (образец САЦ4-Р)



а) поверхность образца ОН-Р-1;
б) поверхность образца ПН-Р

Рисунок 3. Микроструктура металла с признаками старения (x 15 000)

В части упомянутых в начале статьи расслоений металлургического и водородного типов такую оценку можно выполнить на основании анализа результатов других исследований. К примеру, в [6] показано, что расслоения металлургического типа не оказывают влияние на работоспособность металла труб. В работе [5] установлено негативное влияние водородных расслоений на сопротивляемость труб разрушению. Кроме того, безотносительно расслоений негативное влияние водородного охрупчивания на характеристики металла установлено многими исследователями. Влияние расслоения, вызванного протеканием процесса старения в металле, на сопротивляемость разрушению дефектной зоны трубы можно оценить исходя из результатов механических испытаний ме-

талла из образца ОН-БД (таблица 2), в котором по результатам электронно-микроскопических исследований были обнаружены карбидные выделения по границам зерен, аналогичные обнаруженным в зонах расслоений образцов ПН-Р, ОН-Р-1 и ОН-Р-2.

Как видно из таблицы 2, состаренный металл образца ОН-БД при сохранении достаточно высоких прочностных характеристик имеет очень серьезный провал по значениям ударной вязкости (на 35-43 % ниже нормативных значений).

Учитывая данное обстоятельство, можно с уверенностью говорить, что расслоения, вызванные протеканием в металле процесса старения, наряду с расслоениями водородного типа, представляют несоизмеримо большую опасность для трубопровода.

Таблица 2. Результаты механических испытаний металла из образца ОН-БД

№ п/п	Маркировка	Предел текучести σ_t , МПа	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ , %	Ударная вязкость KCV, МДж/см ² (температура испытаний, °С)	
					Поперек оси	Вдоль оси
1	ОН-БД	625	540	22	41,2(-20)	41,1(-20)
					44,4(-20)	41,6(-20)
					33,5(-20)	38,2(-20)
ТУ 48.74		588	461	20	58,8(-20)	58,8(-20)

В части изучения возможности неразрушающей оценки типа расслоения были получены следующие результаты. Метод измерения твердости показал нечувствительность к различным типам расслоений (таблица 3).

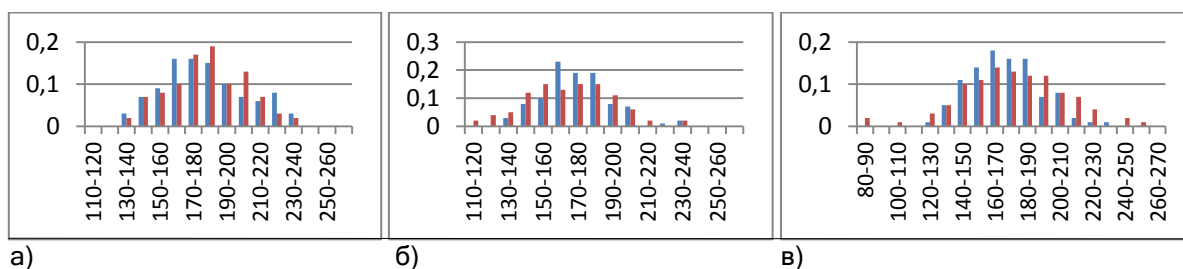
Это объясняется тем, что значения твердости отражают макромасштабное упрочнение (или аналогичное разупрочнение) и не в состоянии отреагировать на такие процессы, как выделение карбидов (в случае со старением) или образование микротрещин (в случае с водородным охрупчиванием).

Метод измерения микротвердости, напротив, показал впечатляющие результаты. С помощью способа неразрушающей экспресс-оценки состояния металла, предложенного в

[8], удалось идентифицировать различные типы расслоений. В зоне расслоений, имеющих металлургическую природу, не наблюдалось каких-либо изменений на гистограмме поверхностной микротвердости, в сравнении с исходным состоянием (рисунок 4, а). В случае образования расслоений по причине протекания процесса старения на гистограмме микротвердости появлялся массив более низких значений относительно исходного распределения (рисунок 4, б). И, наконец, в случае расслоений водородного типа в распределении микротвердости появлялись единичные провалы значений, соответствующие попаданию индентора в микротрещины или предельно хрупкие зоны (рисунок 4, в).

Таблица 3. Результаты измерения твердости металла образцов ПН-Р и 17Г1С-А3

Тип образца	Значение твердости, кгс/мм ²		
	Зона № 1	Зона № 2	Зона № 3
ПН-Р	140	144	142
	137	138	143
	142	139	138
	141	141	140
	141	142	143
	Среднее: 140,2	Среднее: 140,8	Среднее: 141,2
17Г1С-А3	145	140	144
	144	137	143
	140	143	141
	142	141	141
	139	138	145
	Среднее: 142,0	Среднее: 139,8	Среднее: 142,2



■ - металл в зоне расслоения; ■ - бездефектный металл

а) образец УН-Р с металлургическим расслоением (■);
 б) образец ПН-Р с расслоением, вызванным старением (■);
 в) образец САЦ4-Р с расслоением водородного типа (■)

Рисунок 4. Распределение поверхностной микротвердости образцов

Вывод

Исследования образцов металла труб с расслоениями позволили получить ряд ценных сведений.

Во-первых, было установлено, что помимо известных причин образования расслоений, связанных с ликвационными зонами металла в центральной части проката, а также с его наводороживанием, существует еще одна - протекание процессов деформационного старения. Эти процессы проявляются в образовании карбидной сетки по границам зерен и приводят к охрупчиванию металла, что под действием сложного напряженно-деформированного состояния может вызвать появление расслоений, способных к непро-

гнозируемому развитию и угрожающих несущей способности трубопровода.

Во-вторых, показано, что в отличие от получения значений твердости, способ, предложенный в работе [8], основанный на сравнительном анализе выборки значений микротвердости поверхности металла, позволяет оперативно установить фундаментальные причины возникновения расслоения. Учитывая тот факт, что некоторые причины, вызывающие образование расслоений, приводят к падению эксплуатационных свойств металла, подобная информация является крайне важной для разработки эффективных норм оценки допустимости данных дефектов.

Список литературы

1. РД-23.040.00-КТН-011-16. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами.
2. Инструкция по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов: нормативный документ ПАО «Газпром». М.: ПАО «Газпром», 2013. 117 с.
3. СТО Газпром 2-2.3-483-2010. Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ОАО «Газпром». Технические требования к трубам, бывшим в эксплуатации, отремонтированным в заводских условиях. М.: Газпром экспо, 2011. 189 с.
4. Гареев А.Г., Насибуллина О.А., Ризванов Р.Г. Исследование водородного охрупчивания металла, приводящего к разрушению металлоконструкции // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Вып. 1 (107). С. 107-115.
5. Пантелеенко Ф.И., Снарский А.С., Крыленко А.В., Шешуков А.Н. Влияние сероводородного расслоения на механические свойства металла нефтеперерабатывающего оборудования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 12. С. 52-56.
6. Колотовский А.Н., Яковлев А.Я., Бирилло И.Н., Теплинский Ю.А. Работоспособность трубопроводов высокого давления при наличии внутренних расслоений металла. М.: ЦентрЛит-НефтеГаз, 2009. 222 с.
7. Зорин А.Е. Разработка портативного микротвердомера для выполнения неразрушающей оценки состояния металла газопроводов // Нефть, газ и бизнес. 2015. № 8. С. 35-38.
8. Зорин А.Е. Разработка способа качественной оценки технического состояния металла кон-

References

1. RD-23.040.00-KTN-011-16. Magistral'nyi truboprovodnyi transport nefti i nefteproduktov. Opredelenie prochnosti i dolgovechnosti trub i svarynykh soedinenii s defektami [RD-23.040.00-KTN-011-16. Main Pipeline Transport of Oil and Oil Products. Determination of the Strength and Durability of Pipes and Welded Joints with Defects]. [in Russian].
2. Instruksiya po otsenke defektov trub i soedinitel'nykh detalei pri remonte i diagnostirovanii magistral'nykh gazoprovodov: normativnyi dokument PAO «Gazprom» [Instructions for Evaluating Defects in Pipes and Fittings in the Repair and Diagnostics of Gas Pipelines: a Regulatory Document of PJSC Gazprom]. Moscow, PAO «Gazprom», 2013. 117 p. [in Russian].
3. STO Gazprom 2-2.3-483-2010. Dokumenty normativnye dlya proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii ob'ektov OAO «Gazprom». Tekhnicheskie trebovaniya k trubam, byvshim v ekspluatatsii, oremontirovannym v zavodskikh usloviyakh [STO Gazprom 2-2.3-483-2010. Regulatory Documents for The Design, Construction and Operation of OAO Gazprom's Facilities. Technical Requirements for Pipes that were in Operation, Repaired in the Factory]. Moscow, Gazprom ekspoz, 2011. 189 p. [in Russian].
4. Gareev A.G., Nasibullina O.A., Rizvanov R.G. Issledovanie vodorodnogo okhrupchivaniya metalla, privodyashchego k razrusheniyu metallokonstruktsii [The Study of Hydrogen Embrittlement of the Metal Leading to the Destruction of Metalwork]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2017, Issue 1 (107), pp. 107-115. [in Russian].
5. Panteleenko F.I., Snarskii A.S., Krylenko A.V., Sheshukov A.N. Vliyanie serovodorodnogo rassloeniya na mekhanicheskie svoistva metalla

струкций // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 9.
С. 46-50.

neftepererabatyvayushchego oborudovaniya [Effect of Sulfurated Hydrogen Corrosion on the Mechanical Properties of the Metal of Refinery Equipment]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov - Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2011, Vol. 77, No. 12, pp. 52-56. [in Russian].

6. Kolotovskii A.N., Yakovlev A.Ya., Birillo I.N., Teplinskii Yu.A. *Rabotosposobnost' truboprovodov vysokogo davleniya pri nalichii vnutrennikh rassloenii metalla* [The efficiency of High-Pressure Pipelines in the Presence of Internal Bundles of Metal]. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2009. 222 p.

7. Zorin A.E. *Razrabotka portativnogo mikrotverdomera dlya vypolneniya nerazrushayushchei otsenki sostoyaniya metalla gazoprovodov* [Development of a Portable Micro-hardness Tester to Perform a Non-Destructive Assessment of the State of Metal in Gas Pipelines]. *Neft', gaz i biznes - Oil, Gas, Business*, 2015, No. 8, pp. 35-38.

8. Zorin A.E. *Razrabotka sposoba kachestvennoi otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya metalla konstruksii* [Development of a Method for Qualitative Assessment of the Technical Condition of Metal Structures]. *Territoriya «NEFTEGAZ» - NEFTEGAZ Territory*, 2015, No. 9, pp. 46-50.

Автор

• Зорин Александр Евгеньевич, д-р техн. наук
ООО «ЭКСИКОМ»
Главный научный сотрудник
Российская Федерация, 117447, г. Москва,
ул. Дмитрия Ульянова, д. 43/3
e-mail: zorinae86@rambler.ru

The Author

• Zorin Aleksandr E., Doctor of Engineering Sciences
EKSİKOM LLC
Chief Researcher
43/3, Dmitry Ulyanov str., Moscow,
Russian Federation
e-mail: zorinae86@rambler.ru

• Толстов Анатолий Эдуардович
ООО «Газприбортехнология»
Главный инженер
Российская Федерация, 117342, г. Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 2

• Tolstov Anatoliy E.
Gazpribortekhnologiya LLC
Chief Engineer
65/2 Profsoyuznaya str., Moscow,
Russian Federation