

УДК 620.178;620.181;620.194

В. Бержанский¹, докт. физ.-мат. наук; П. Марущак², докт. техн. наук; Р. Бищак³, канд. техн. наук; И. Данилюк², В. Вишнеvский¹, канд. техн. наук; А. Прокопов¹, канд. физ.-мат. наук; Ф. Панков¹; Н. Луговской¹

¹Таврический национальный университет имени В.И. Вернадского

²Тернопольский национальный технический университет
имени Ивана Пулюя

³Ивано-Франковский национальный технический университет
нефти и газа

КОНТРОЛЬ РАССЕЯННОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА МЕТОДОМ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ ВИХРЕТОКОВОЙ ИНТРОСКОПИИ

Резюме. Выявлены основные закономерности оценки поврежденности материала магистрального газопровода после длительной эксплуатации. Изучены физические аспекты накопления повреждений конструкционных материалов с учетом режимов нагружения конструкции. Проанализировано влияние наводороживания и деформационного старения стенки трубопровода на характеристики прочности и пластичности стали 17Г1С. Методами индентирования установлено исчерпание пластичности материала на микро- и макроуровнях. Установлена корреляционная связь между данными различных методов оценки структурного состояния материала. Получены вихретоковые магнитооптические образы дефектов для тестовых объектов контроля и фрагментов магистрального газопровода «Киев – Запад Украины-1» после сорока лет эксплуатации в земле. Представлены фотографии дефектов и их магнитооптических образов, полученные при различных режимах контроля.

Ключевые слова: трубопроводы, сталь, деградация, неразрушающий контроль.

**V. Berzhansky, P. Maruschak, R. Bishchak, I. Danyliuk, V. Vishnevskii,
A. Prokopov, F. Pankov, N. Lugovs`kyu**

CONTROL OF SCATTERED DAMAGE OF THE MAIN GAS PIPELINE STEEL BY EDDY CURRENT MAGNETO-OPTICAL INTROSCOPY

Summary. The main regularities in the evaluation of the damage degree of the main gas pipeline material after a long-term operation are found in this paper. Physical aspects of damage accumulation in structural materials taking into account loading modes of the structure are studied.

The effect of hydrogenation and deformational aging of the pipeline wall on the characteristics of strength and plasticity of steel 17G1S is analyzed. The methods of indentation were used to determine the exhaustion of the material plasticity at the micro- and macrolevels. The correlation relationship between the data obtained by different evaluation methods of the material structure condition is established.

The methodological peculiarities of using the eddy current introscopy and magnetography based on the magneto-optic bismuth substituted garnet film transducer for the identification and analysis of the scattered structural and mechanical damage, and localized defects are considered. The eddy current magneto-optic images of the defects found in the test control objects and fragments of the “Kyiv-West of Ukraine-1” main gas pipeline after forty years of operation under ground are obtained. The pictures of these defects and their magneto-optic images obtained under various control modes are presented.

The results obtained are important for understanding the failure mechanisms of the pipeline system materials. Especially interesting is an increase in the material non-uniformity, i.e. a change in the condition of the structurally non-uniform medium at different structural level. A decrease in the relative necking indicates the in-service embrittlement of metal, including due to deformation hardening, the indication of which can be the

increased hardness and microhardness A change in the condition of the structural levels of materials takes place during deformation of steel 17G1S.

Key words: piping, steel, degradation, nondestructive testing, magneto-optic introscopy.

Вступление. Магистральные газопроводы являются объектами длительной эксплуатации, в течение которой они подвергаются воздействию циклического нагружения и влиянию коррозионной среды [1]. Основными видами деградации данных конструкций, является стресс-коррозионное повреждение, питтинговая коррозия, а также исчерпание пластичности стенки трубы [2].

Исследования металла газопроводов после различных периодов эксплуатации, показывают, что в процессе наработки в нем накапливаются структурно-механические дефекты, не свойственные металлу в исходном состоянии [3]. Источником исчерпания пластичности металла трубы магистрального газопровода могут служить коррозионные процессы на его поверхности, способствующие диффузии водорода в стенку трубы. Снижение несущей способности и разрушение труб, в большинстве случаев, обусловлены локализацией рассеянных повреждений. Их накопление и объединение приводит к образованию микро- и макродефектов. Кинетика этого стадийного процесса является чрезвычайно сложной и требует дальнейшего изучения [4].

Комплексная оценка поврежденности материалов трубопроводов после длительной наработки позволяет повысить достоверность диагностических работ. В настоящее время активно развивается магнитооптическая (МО) вихретоковая (ВТ) интроскопия, являющаяся относительно новым видом дефектоскопии [5 – 7]. Основным ее преимуществом является визуализация дефектов в режиме реального времени, малые габариты и относительная простота изготовления основных деталей интроскопа. Данный метод позволяет проводить непосредственную визуализацию дефектов, в то время как другие магнитные методы [9 – 10] требуют, как правило, решения обратной задачи – восстановления образа дефекта по полям рассеяния, измеряемым с помощью набора датчиков (феррозондов). Разрешение феррозондовых методов зависит, в том числе, от количества датчиков на единицу площади, а оно обычно невелико.

Цель данной работы – оценка деградации материала магистрального газопровода с помощью МО ВТ интроскопии, индентирования и ряда других механических испытаний.

Методика исследований. Исследовали фрагмент магистрального газопровода «Киев – Запад Украины-1» после сорока лет эксплуатации в земле. Газопровод имеет диаметр 1020 мм с толщиной стенки 10 мм. Механические испытания образцов, вырезанных в продольном направлении трубы, проводились на сервогидравлической установке СТМ-100. Исследовались также твердость на приборе «Супер-Роквелл» и микротвердость на приборе ПМТ-3, осуществлялся контроль состояния материала методом МО интроскопии.

Принцип работы МО вихретокового интроскопа основан на реакции подвижной доменной структуры (ДС) магнитооптического сенсора на распределение магнитных полей, создаваемых ВТ в исследуемом проводящем материале. Визуализация ДС осуществляется за счет эффекта Фарадея, в результате действия которого происходит вращение плоскости поляризации проходящего сквозь прозрачный магнетик оптического излучения в зависимости от направления локальной намагниченности. Наличие дефектов в металлическом объекте приводит к изменению траекторий вихревых токов и соответственному изменению конфигурации порождаемых ими магнитных полей [5, 6].

Для генерации вихревых токов в работе использованы сменные индукторы для формирования нормального и планарного полей, питаемые от мощного источника тока пилообразной формы амплитудой до 20А. Регистрация изменений ДС осуществляется стробоскопическим методом, причем конкретный вид ДС зависит от фазы строба, то есть положения импульса засветки относительно амплитуды переменного магнитного поля [7, 8]. Длительность стробирующего импульса может меняться, но обычно составляет 5% периода тока в индукторе.

Основным элементом интроскопа [8] является МО сенсор, регистрирующий магнитные поля рассеяния. Таким сенсором служат монокристаллические пленки ферритов-гранатов с повышенным содержанием висмута, синтезируемые методом эпитаксии из жидкой фазы. Как правило, пленкам присуща перпендикулярная одноосная анизотропия и в равновесном состоянии – лабиринтная ДС. Регистрация эффекта Фарадея осуществлялась в отраженном поляризованном свете, в связи с чем на пленки напылением в вакууме наносилось износостойчивое зеркальное покрытие из нитрида титана. В качестве источника света использовали матричный светодиодный излучатель, освещавший поляризованным светом МО сенсор, установленный на поверхности испытуемого образца. Отражаясь от зеркала, свет дважды проходит сквозь пленку и меняет поляризацию в зависимости от ее магнитного состояния. После отражения свет проходит анализатор и линзовую систему, формирующую изображение на ПЗС – матрице, которая подключена к персональному компьютеру. Оптические и МО ВТ изображения (образы) в режиме реального времени фиксируются в форматах цифровой фотографии или видеоролика при наблюдении динамического изменения доменной структуры.

Известно, что в трубной диагностике важную роль играет дефектоскопия сварных швов, которые испытывают максимальные нагрузки в процессе эксплуатации. В качестве демонстрации возможностей интроскопии на рис. 1 приведены МОВТ образы сварных швов в тестовых образцах из алюминия и нержавеющей стали. Швы выполнены в пластинах толщиной 5 мм и заполированы так, что не обнаруживаются визуально. Использован индуктор планарного поля; ток в индукторе с частотой 25 КГц. Видно, что качество шва в алюминии выше, чем в нержавеющей стали.

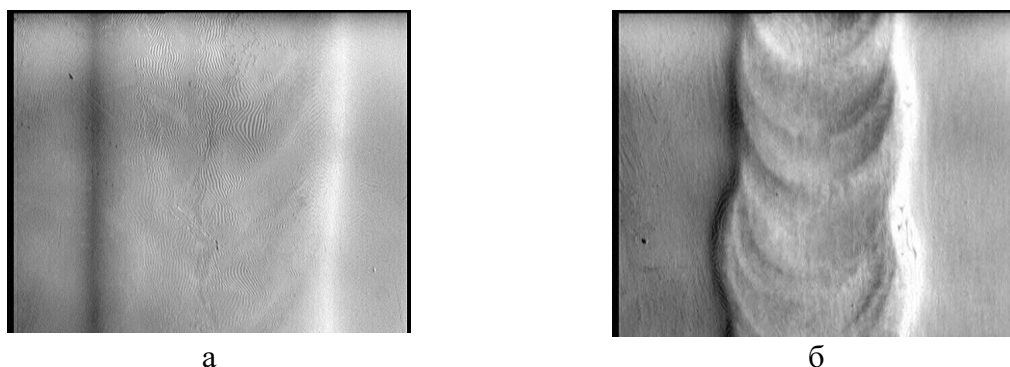


Рисунок 1. МОВТ образы сварных швов в тестовых образцах из алюминия (а) и нержавеющей стали (б) (увеличение около 10^{\times})

Figure 1. MOVT images of wildings in the testing specimens made of aluminum (a) and stainless steel (b) (multiplied 10^{\times})

В результате проведения тестовых испытаний было показано, что МОВТ интроскоп позволяет легко обнаруживать модельные дефекты различной геометрии, в том числе линейные дефекты типа «щель», цилиндрические дефекты, сварные швы

[11]. Минимальный размер обнаруживаемых линейных дефектов составлял 10 мкм и обуславливался лишь имеющимися в наличии тестовыми объектами. Следует отметить, что метод позволяет обнаруживать глубинные (скрытые) дефекты. Например, щели шириной 10 мкм визуализировались при экранировании их алюминиевой пластиной толщиной в миллиметр.

Механические свойства металла эксплуатируемого трубопровода. Обнаружено, что механические свойства стали 17Г1С, после длительной наработки, существенно отличаются от исходного материала (табл. 1). Очевидно, происходит исчерпание пластичности (упрочнение) материала. Обнаружено увеличение относительного удлинения материала, вырезанного вдоль трубы, которое обусловлено раскрытием множественных дефектов поврежденного материала.

Таблица 1

Механические свойства стали 17Г1С трубы газопровода в исходном состоянии и после 40 лет эксплуатации

Характеристики	Условный предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Условный предел прочности, σ_B , МПа	Относительное удлинение, ϵ , %	Относительное сужение, ϕ , %
Новая труба (сертификат 162/3-69)	430	580	23,5-26,0	-
Труба после наработки	460	720	44,0	46,0

Фрактографический анализ поверхностей разрушенных образцов выявил значительное количество дефектов. Локальная деформация, раскрытие и изменение формы дефектов добавлялись к общей зарегистрированной деформации и были отражены в деформации рабочей части образца [1 – 3].

Результаты данной работы хорошо согласовываются с данными полученными другими исследователями [2 – 3]. Например, подтверждается, что относительное сужение шейки разрушенного образца является наиболее чувствительным и информативным при определении водородного охрупчивания и структурной деградации материалов газо- и нефтепроводов.

Твердость и микротвердость. В исходном состоянии микротвердость стали 17Г1С составляла 1200 МПа. Для деградированной трубы величина микротвердости (H_μ) с отдалением от внутренней поверхности трубы монотонно возрастает от 1150 МПа с выходом на «насыщение» при 1700 МПа. Очевидно, в микрообъемах материала происходит закрепление дислокаций, обусловленное стресс-коррозионным воздействием. Твердость эксплуатируемого материала также повышается по сравнению с исходным состоянием. Данные изменения твердости приведены в табл. 2.

Таблица 2

Твердость стали 17Г1С трубы газопровода в исходном состоянии и после 40 лет эксплуатации

Относительная толщина стенки (при анализе от внутренней поверхности)	Твердость, HRB		
	0,1h, мм	0,5h, мм	h, мм
Новая труба (сертификат 162/3-69)	79		
Труба после наработки	89	91	88

Интроскопические исследования. Образцы труб магистрального газопровода в исходном состоянии и после 40 лет эксплуатационной наработки исследовали посредством МОВТ интроскопии в диапазоне частот от 8 до 60 кГц при наложении постоянных однородных магнитных полей от 0 до 25 Э. Установлено значительное изменение характера динамической ДС при возбуждении в образцах вихревых токов индуктором нормального поля амплитудой 40 Э и частотой 8 кГц. На обоих образцах не обнаруживались линейные дефекты типа трещин. Тем не менее, на исходном образце наблюдалась дефектная область, которая не исчезает даже при сравнительно больших подмагничивающих полях (рис. 2).

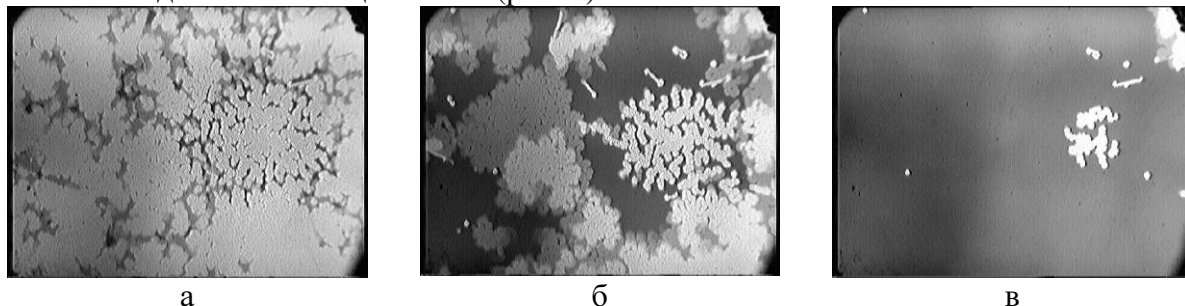


Рисунок 2. Вид МОВТ образа дефекта на исходном образце трубы при различных подмагничивающих полях: а – 15 Э, б – 17 Э, в – 19 Э

Figure 2. Appearance of MOVT image defect on the initial specimen of the pipe at different magnetified fields: а – 15 erg, б – 17 erg in в – 19 erg

Увеличение поля подмагничивания приводит к изменению динамической доменной структуры. Возникает область неустойчивой мелкой квазилабиринтной структуры. При этом, для деградированного материала необходимо большее подмагничивающее поле для возбуждения динамической неустойчивости. В поле 20 Э исходный образец уже находится в насыщенном состоянии, тогда как в 40-летнем образце еще наблюдается динамическая доменная структура (рис. 3). Это свидетельствует о существенном отличии поверхностных магнитных свойств исследованных образцов.

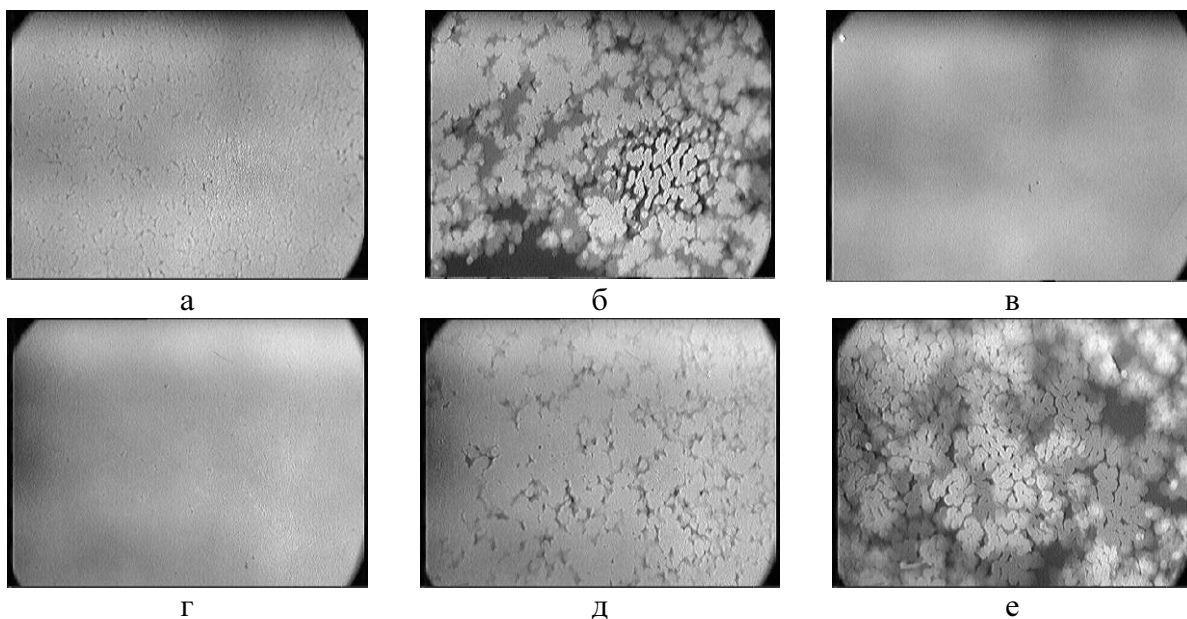


Рисунок 3. МОВТ образы поверхностной доменной структуры на образцах трубопроводной стали при различных подмагничивающих полях: а,г – 12 Э, б,д – 16 Э, в,е – 20 Э. Исходный образец: а-в; образец после 40 лет наработки: г-е

Figure 3. MOVT specimens of the surface on the specimens of the pipeline steel at different magnetized fields: а,г – 12 erg б,д – 16 erg, в,е – 20 erg. Initial specimen а-в and specimen after 40 years of service – г-е.

Обсуждение. Полученные результаты дают основание полагать, что эксплуатационная деградация металла магистрального газопровода после длительной наработки проявляется не только в деформационном старении, но и в интенсивном развитии повреждаемости (дефектности) на микро- и субмикроуровнях. Это подтверждается изменением механических свойств металла в результате длительной эксплуатации: повышением твердости и микротвердости, а также повышением прочности, при одновременном увеличении относительного удлинения [12].

Полученные результаты хорошо согласуются с данными МО вихретоковой интроскопии. В материале после длительной эксплуатационной наработки возникают значительные упругие напряжения, которые в силу магнитоупругого взаимодействия приводят к существенному изменению магнитной анизотропии и, соответственно, полевой зависимости намагниченности в приповерхностных слоях. Именно эти параметры являются определяющими при возникновении доменной структуры и формирования ее динамики (рис. 3).

Полученные физические закономерности подтверждаются относительным изменением механических свойств стали 17Г1С [2]:

$$\lambda_{\varphi} = [(\varphi^0 - \varphi^{\text{дег}}) / \varphi^0] \times 100\%,$$

где φ^0 , $\varphi^{\text{дег}}$ – относительное изменение свойств материала на примере изменения относительного сужения в исходном состоянии и после эксплуатации.

Обобщенные данные деградации материала трубы в относительных координатах для различных механических свойств показаны на рис. 4.

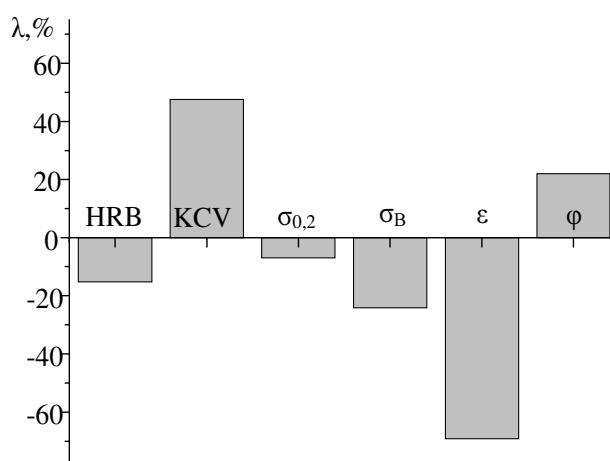


Рисунок 4. Деградация механических свойств стали 17Г1С после 40 лет эксплуатации

Figure 4. Degradation of the mechanic properties of steel 17G1S after 40 years of operation

Таким образом, одной из основных причин снижения деформационных свойств стали газопровода после длительной наработки является негетогенное распределение

повреждений в материале, вызванное истощением пластичности и упрочнения стенки трубы.

При этом, одной из причин инициации разрушения магистральных газопроводов может быть локализованная нестабильность деформационного процесса, обусловленная наличием структурных дефектов на микро- или мезоуровне [13], выявленных в данной работе.

Выводы. Исследованы основные закономерности изменения механических свойств металла магистрального газопровода, где наряду со стандартными механическими методами исследований использовались специальные более чувствительные к структурной деградации методы неразрушающего контроля, такие, как магнитооптическая вихретоковая интроскопия.

Полученные результаты позволяют рассматривать снижение сопротивляемости длительно эксплуатируемых металлов труб магистральных газопроводов хрупкому разрушению и коррозии как результат накопления рассеянных повреждений, обусловленных структурной деградацией и образованием охрупченных областей.

Conclusions. The basic change mechanisms of the mechanical properties of the metal gas pipeline have been studied. Along with the standard mechanical methods of research special more sensitive to structural degradation non-destructive testing methods, such as eddy current magneto-optic introscopy have been used.

The results allow to consider reducing of resistance of long-term operated gas pipelines tubes to brittle fracture and corrosion as the result of accumulation of scattered damages caused by the structural degradation and formation of embrittlement areas in the specimen.

Список использованной литературы

1. Крижанівський, Є.І. Захист довкілля від аварій і катастроф трубопровідних систем в складних умовах експлуатації [Текст] / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний, Л.Є. Шкіца // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 1 (22). – С. 77 – 82.
2. Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite-pearlite steel / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk et al. // Mat. and Corr. – 2009. – № 9. – P. 716 – 725.
3. Environmentally assisted “in-bulk” steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyurulnyk et al. // Engineering Failure Analysis. – 2010. – Vol. 17. – P. 624 – 632.
4. Неруйнівні методи визначення фізико-механічних характеристик металоконструкцій тривалої експлуатації [Текст] / М.О. Карпаш, Є.Р. Доценко, Н.Л. Тацакович, О.М. Карпаш. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 309 с.
5. Абакумов, А.А. Магнитная интроскопия [Текст] / А.А. Абакумов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 272 с.
6. Magneto-optic eddy current imaging of aging aircraft: A new NDI technique / G.L. Fitzpatrick, D.K. Thome et al. // Materials Evaluation. – 1993. – Vol. 51. – No. 12. – P. 1402.
7. Магнитооптический вихретоковый контроль: интроскопический и магнитографический методы [Текст] / В.Г. Вишнеvский, В.Н. Бержанский, Г.П. Козик и др. // Ученые записки Таврического нац. ун-та. Серия «Физ.-мат. науки». – 2011. – Т. 24(63). – № 2. – С. 127 – 140.
8. Magneto-optic eddy current introscopy based on garnet films / V. Vishnevskii, V. Berzhansky, V. Mikhailov, F. Pankov, A. Nedviga, A. Nesteruk // Solid State Phenomena. – 2013. – Vol. 200. – P. 245 – 249.
9. Матюк, В.Ф. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии [Текст] / В.Ф. Матюк, В.Н. Кулагин // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 3. – С. 4 – 14.
10. О современном состоянии контроля надежности магистральных трубопроводов [Текст] / П.А. Халилеев, Б.В. Патраманский, В.Е. Лоскутов и др. // Дефектоскопия. – 2000. – № 1. – С. 3 – 17.
11. Роль поля смещения в магнитооптической вихретоковой интроскопии [Текст] / Н.В. Луговской, В.Н. Бержанский и др. // Труды междунар. конф. «Актуальные задачи современных технологий» (19 – 20 декабря). – Тернополь, 2012. – С. 5 – 6.
12. Effect of long term operation on degradation of material of main gas pipeline / P. Maruschak, R. Bishchak, I. Konovalenko et al. // Abstr. of the 15th Intern. Symp. on Metallography, Slovakia, Košice, April 24 – 26, 2013, P. 56.

13. Panin, V.E. Foundations of physical mesomechanics of structurally inhomogeneous media / V.E. Panin, Yu.V. Grinyaev, V.E. Egorushkin // Mechanics of Solids. – 2010. – Vol. 45. – Issue 4. – P. 501 – 518.

Получено 29.08.2013