

Влияние обработки импульсным электрическим током на скорость коррозии и прочность образцов из стали 45

А. И. Бабуцкий

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты статических испытаний на растяжение образцов из стали 45 после выдержки в течение 100 ч в коррозионной среде. Показано, что благодаря предварительной обработке образцов импульсным электрическим током высокой плотности снижается скорость коррозии металла, в результате чего их прочность оказывается выше прочности образцов без обработки.

Ключевые слова: коррозия, прочность, обработка импульсным электрическим током.

Введение. Коррозия представляет собой естественный процесс повреждения вещества, обычно металлических материалов, или ухудшения его свойств в результате взаимодействия с окружающей средой. Проблема коррозии является актуальной, при этом если одни коррозионные повреждения носят косметический характер, то другие могут приводить к катастрофическим последствиям. Разрушение детали или конструкции в целом происходит из-за возникновения локализованных коррозионных язв, являющихся концентраторами напряжений, уменьшения рабочего сечения детали, а также снижения характеристик прочности и пластичности металла.

Поскольку воздействие коррозии проявляется, начиная от строительных конструкций, сооружений и мостов, систем транспорта (все виды подвижного состава и трубопроводов) и заканчивая бытовыми материалами и приборами, то экономический ущерб оказывается колоссальным. Так, по данным исследования [1] в США общие прямые потери от коррозии в 26 секторах промышленности ежегодно составляют порядка 276 млрд. долларов (более 3% ВВП США). Можно предположить, что аналогичный процент потерь имеет место в большинстве развитых стран.

Учитывая масштабы и разнообразие форм коррозии, полностью устранить ее не представляется возможным. Вместе с тем результаты исследования [1] показывают, что затраты, связанные с коррозией, могут быть уменьшены на 25...30% за счет внедрения оптимальных мероприятий по ее контролю, в частности различных видов обработок (нанесение покрытий и др.). В связи с этим понятен интерес к разработке новых и эффективных методов антикоррозионной обработки металлических материалов.

Ранее [2, 3] было установлено, что обработка, основанная на прямом пропускании импульсного электрического тока (ИЭТ) высокой плотности, существенно увеличивает коррозионную стойкость стали HSLA и алюминиевого сплава 5182. Настоящее исследование выполнено с целью оценки влияния обработки ИЭТ на коррозию и прочность образцов из стали 45.

Образцы и методики экспериментальных исследований. Для испытаний на растяжение использовали стандартные пятикратные цилиндрические образцы (диаметр рабочей части 5 мм), изготовленные из катаных прутков (диаметр 10 мм) из среднеуглеродистой стали 45 в состоянии поставки следующего состава (%): 0,45 С; 0,5...0,8 Мn; 0,25 Ni; 0,25 Cr; 0,05 Cu; 0,17...0,37 Si; 0,08 As; 0,035 P и 0,04 S. Дополнительно для проведения измерений твердости из того же материала изготавливали образец в виде цилиндра диаметром 5 и длиной 55 мм.

Для испытаний на растяжение использовали три группы образцов по три образца в каждой. Перед испытаниями шесть образцов помещали в коррозионную камеру, из них три образца предварительно обрабатывали ИЭТ. Все образцы перед выдержкой в течение 100 ч в среде солевого тумана (5%-ный раствор NaCl), которую осуществляли аналогично [2], и после выдержки тщательно взвешивали. Перед взвешиванием их очищали от продуктов коррозии и сушили. По результатам взвешивания определяли потерю (убыль) веса образцов вследствие коррозии.

Испытания на статическое растяжение проводили на сервогидравлической универсальной испытательной машине BiSS Bi-00-202 (BiSS, Индия) при скорости нагружения 0,1 мм/мин.

Дополнительно с применением компьютеризованного твердомера COMPUTEST SC (ERNST, Швейцария) на образце в исходном состоянии и после обработки ИЭТ измеряли твердость металла по Роквеллу (шкала *HRB*).

Обработка ИЭТ заключалась в разряде батареи высоковольтных конденсаторов непосредственно через образец. При этом с помощью пояса (катушки) Роговского и высокочастотной аналого-цифровой платы PCI-9810 (ADLINK Technology, Тайвань), установленной на персональном компьютере, регистрировали параметры тока разряда. Для всех образцов использовали один и тот же режим зарядки батареи конденсаторов: напряжение $U_0 = 2,7$ кВ; емкость $C = 150$ мкФ. Согласно результатам регистрации это обеспечивало ток разряда порядка 30 кА (рис. 1).

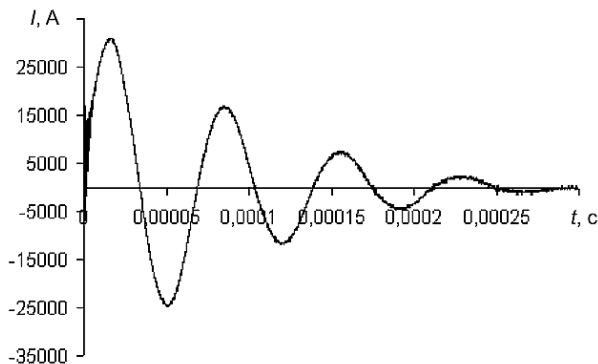


Рис. 1. Зарегистрированный импульс электрического тока, используемый при обработке.

Каждый образец, включая и образец для измерений твердости, обрабатывали три раза при одних и тех же параметрах ИЭТ. Прирост температуры образцов (в среднем около 7°C), вызванный действием импульса тока, конт-

ролировали с использованием термопары, которая прижималась к середине образца и изготовлялась из хромелевой и алюмелевой проволок диаметром 0,2 мм.

Результаты испытаний. На рис. 2 представлены образцы после выдержки в коррозионной камере и удаления окислов. Видно различие в состоянии поверхности металла необработанных и обработанных ИЭТ образцов. Если в первом случае наряду с общей коррозией имеют место участки с локализованной коррозией на глубину около 0,1–0,2 мм, то во втором – они практически отсутствуют. На рис. 3 приведены результаты взвешивания образцов, усредненные по данным трех образцов для каждой группы. В нашем случае продукты коррозии в виде окисла Fe_2O_3 не закрепляются на поверхности образцов, следовательно, выдержка в коррозионной среде приводит к потере их веса.

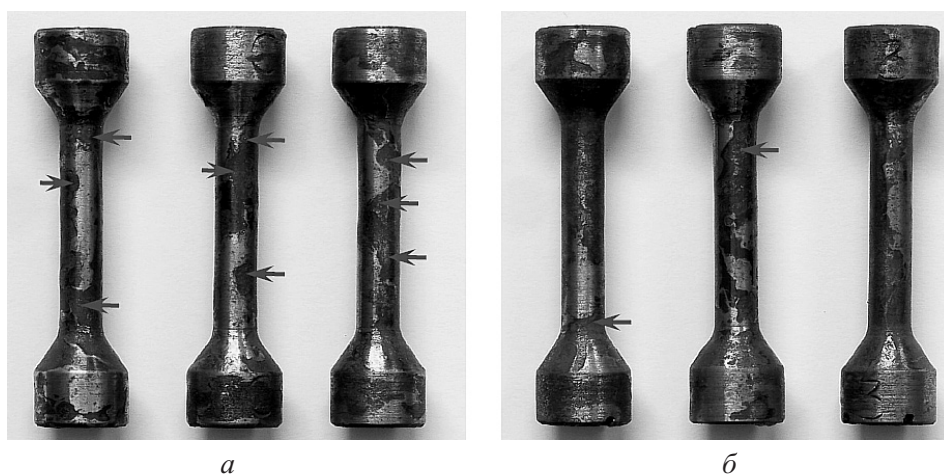


Рис. 2. Внешний вид образцов после выдержки в коррозионной среде в течение 100 ч и удаления окислов: *а* – без обработки, *б* – после обработки ИЭТ (стрелками указаны участки с локализованной коррозией на глубину 0,1–0,2 мм).

Данные рис. 3 показывают, что благодаря обработке ИЭТ существенно уменьшается скорость убыли веса образцов, т.е. снижается скорость коррозии. После 100 ч выдержки убыль веса необработанных образцов на 24% выше, чем обработанных ИЭТ. Указанная оценка является консервативной, поскольку как для обработанных, так и необработанных образцов определялась общая убыль веса. Между тем при обработке ток высокой плотности проходил только через рабочую часть образца, в захватных частях плотность тока была ниже.

Результаты статических испытаний на растяжение трех групп образцов приведены на рис. 4 и 5. Характерные диаграммы усилие–деформация при растяжении исходного и корродированных (без обработки и после обработки ИЭТ) образцов представлены на рис. 6. Согласно результатам испытаний выдержка в коррозионной среде в течение 100 ч снижает прочность образцов в исходном (необработанном) состоянии: для корродированных образцов усилие начала пластического течения (достижение образцом деформации 0,02%) уменьшается на 4%, предельное усилие – на 5%. Стимулированное

коррозией снижение прочности образцов, предварительно обработанных ИЭТ, по сравнению с исходными некорродированными образцами ниже: усилие начала пластического течения уменьшается на 1,4%, предельное усилие – на 2,4%.

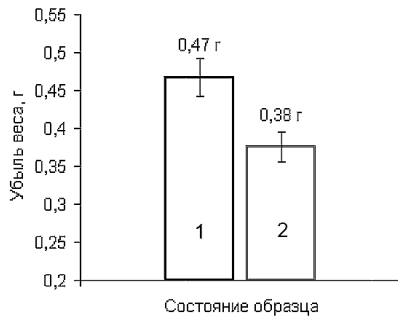


Рис. 3. Средняя убыль веса образцов после 100 ч выдержки в коррозионной среде в зависимости от их состояния: 1 – исходное; 2 – после обработки ИЭТ.

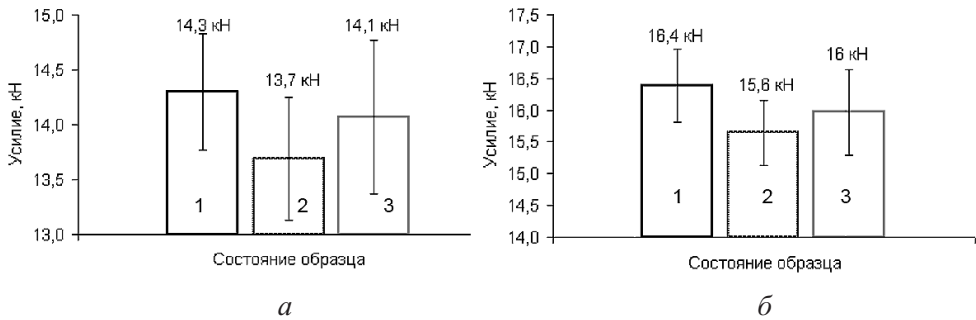


Рис. 4. Изменение усилия начала пластического течения (а) и предельного усилия (б) образцов при растяжении в зависимости от их состояния. (Здесь и на рис. 5 и 6: 1 – исходное; 2 – исходное после коррозии; 3 – после ИЭТ и коррозии.)

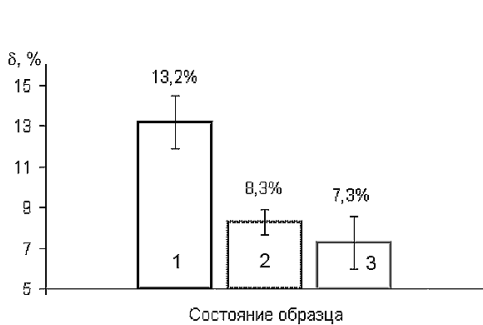


Рис. 5

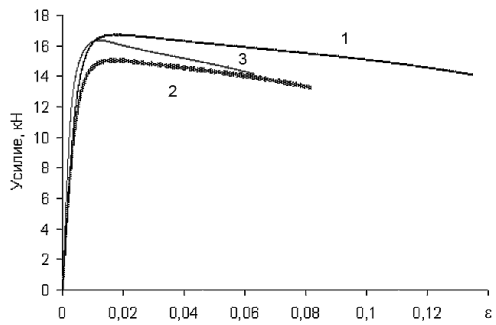


Рис. 6

Рис. 5. Изменение относительного удлинения образцов при растяжении в зависимости от их состояния.

Рис. 6. Диаграммы усилие–деформация при растяжении образцов в зависимости от их состояния.

Таким образом, после обработки ИЭТ величина деградации прочности образцов уменьшается более чем в два раза. Можно предположить, что такая

тенденция будет сохраняться и при более длительной выдержке образцов в условиях коррозии. Что касается пластичности образцов, то из данных, приведенных на рис. 5, следует: в результате коррозии относительное удлинение до разрушения снижается практически на 40%. После предварительной обработки ИЭТ характер влияния коррозии на пластичность образцов не изменяется.

Результаты измерения твердости приведены в таблице (один и тот же образец использовали для измерений в исходном состоянии и после обработки ИЭТ). Видно, что среднее значение твердости после обработки практически не изменяется: имеет место рост твердости всего на 5%.

Результаты измерения твердости

Состояние образца	Число замеров	Твердость, <i>HRB</i>			
		средняя	минимальная	максимальная	среднеквадратическое отклонение
Исходное	158	95,0	89,8	98,1	1,50
После обработки ИЭТ	252	99,5	95,7	102,6	1,22

Обсуждение результатов. Известно [4, 5], что обработка ИЭТ, как и обработка импульсным магнитным полем, положительно влияет на механические свойства конструкционных материалов. Однако причины и механизмы такого влияния недостаточно определены и подкреплены результатами исследований. Экспериментальные исследования по применению этого вида обработки для снижения коррозии металлических конструкционных материалов ограничены (наряду с работами [2, 3] можно назвать, например, [6, 7]).

В частности, в [7] использовалась аналогичная обработка, основанная на прямом пропускании ИЭТ через образцы из трубной стали, в результате чего существенно увеличилось сопротивление металла коррозионному растрескиванию под напряжением. Это обусловлено значительным измельчением структуры стали вследствие обработки: наблюдения, выполненные с использованием сканирующего электронного микроскопа, показывают, что размер зерен уменьшился с 4...7 до 2...5 мкм. Авторы [7] полагают, что указанное измельчение является результатом ферритно-аустенитного превращения в твердом состоянии, имевшего место в процессе нагрева, вызванного обработкой ИЭТ. По их оценкам прирост температуры образцов при обработке ИЭТ плотностью $j = 8,3 \text{ кА/мм}^2$ (и выше) составляет около 960 К (и выше). Поскольку испытания проводились при комнатной температуре (298 К), результирующий нагрев образцов был выше температуры A_{c3} и соответствовал температурам, требуемым для указанного измельчения зерен.

Несмотря на то что в настоящем исследовании использовалась практически такая же обработка ИЭТ, полученный эффект увеличения коррозионной стойкости стали 45 нельзя объяснить по аналогии с [7]. В нашем случае плотность тока в образцах была значительно ниже (максимальная усредненная плотность тока для образцов j_{cp} , рассчитанная как отношение макси-

мума тока к площади поперечного сечения, составляет $1,5 \text{ кА/мм}^2$), и вызванный обработкой прирост температуры образцов не превышает 7°C . Такой прирост температуры явно недостаточен для любого термоактивируемого превращения в твердой фазе.

Следовательно, чтобы объяснить полученный эффект повышения коррозионной стойкости, необходимо исходить из иных представлений. В данном случае имеет место электрохимическая коррозия, приводящая к повреждению металла в электропроводной среде (растворе электролита). Суть механизма электрохимической коррозии заключается в возникновении на поверхности металлов или сплавов короткозамкнутых гальванических элементов, при работе которых происходит растворение металлической поверхности. Поверхность металлов имеет различные электродные потенциалы как результат формирования анодных (с низким электродным потенциалом) и катодных (с высоким электродным потенциалом) зон. Указанные зоны возникают вследствие разной шероховатости поверхности, наличия защитных пленок и других факторов. Причинами, активирующими коррозионные процессы, являются различия в микроструктуре металла, в частности, связанные с разными размерами зерен, анизотропией поликристаллов, выходом на поверхность дислокаций, наличием включений и неоднородных остаточных напряжений (ОН).

Остаточные механические напряжения в металле играют важную роль, поскольку под влиянием растягивающих ОН в нем возникают анодные зоны [8] как на макро-, так и на микроуровне. Например, в [9] наблюдалась корреляция между распределением ОН по длине трубы магистрального газопровода и возникновением локальной коррозии в областях с высокой деформацией. В работе [10] при проведении исследований использовались плоские образцы, изготовленные из трубной стали, с большим градиентом ОН как в продольном направлении, так и по толщине. В результате получено, что формирование микропиттингов имело место преимущественно в областях с максимальными растягивающими ОН, в то время как в областях с сжимающими ОН коррозия практически отсутствовала. Что касается микроуровня, то в работе [11] установлена связь между поверхностными напряжениями и питтинговой коррозией в ферритно-аустенитной переходной зоне размером около 15 мкм . С использованием специально разработанной методики было показано, что при градиенте напряжений ниже 15 МПа/мкм микропиттинги не возникают, в то время как при градиентах напряжений выше 20 МПа/мкм систематически наблюдались метастабильные и стабильные питтинги.

Хорошо известно, что практически все производственные процессы, связанные с обработкой металлов давлением, технологическими термическими циклами (сварка, нанесение покрытий), а также с резанием (точение, шлифование и др.), сопровождаются формированием ОН. Обычно полагают, что напряжения не изменяются вдоль обработанной поверхности. Однако использование современных средств измерения позволяет определить их вариацию по поверхности. В работе [12], основываясь на измерениях дифракции рентгеновских лучей в нескольких местах на каждом из обработанных образцов, был установлен существенный разброс поверхностных ОН для двух серий образцов из титанового сплава Ti6Al4V (одна серия – после шлифования, вторая – после точения). Следовательно, можно заключить, что все реальные

детали имеют разброс поверхностных ОН, и если эти напряжения являются растягивающими, а металл детали потенциально может быть подвержен электрохимической коррозии, то зоны с высокими растягивающими ОН будут служить инициаторами как питтинг-коррозии, так и общей коррозии.

Известно, что прохождение через металл ИЭТ высокой плотности вызывает релаксацию механических напряжений как для растягиваемых образцов [5, 6], так и для элементов и деталей с ОН различной природы [13]. Несмотря на отсутствие хорошо разработанной теории данного эффекта, он может быть объяснен увеличением подвижности дислокаций вследствие действия тока высокой плотности. После многолетних исследований влияния ИЭТ на поведение металлов и, в частности, на релаксацию напряжений было установлено [4], что существует пороговый уровень плотности тока $j \approx 1 \text{ кА/мм}^2$, выше которого в металле достаточно легко реализуется эффект релаксации напряжений.

Как следует из данных регистрации ИЭТ при выполнении настоящего исследования, плотность тока на поверхности обработанных образцов (с учетом скин-эффекта) составляет более $1,5 \text{ кА/мм}^2$. Следовательно, на поверхности образцов создаются условия для реализации вышеуказанного механизма релаксации ОН. Можно предположить, что вследствие снижения растягивающих ОН происходит выравнивание напряженно-деформированного состояния.

Подтверждением вышеизложенному служит следующая оценка. Однородность металла может быть определена путем измерения твердости его поверхности при вдавливании [14, 15]. Особенностью твердости является наличие корреляции с другими механическими характеристиками, например пределом прочности и пределом выносливости. Если получить представительный массив замеров твердости на поверхности образца, то по вариации ее значений можно оценить вариацию механических свойств металла и, следовательно, степень его однородности. Иными словами, разброс значений твердости может отражать состояние микроструктуры металла. Например, в работе [15] показано, что наименьший разброс значений твердости соответствует металлу в исходном состоянии с наиболее однородной микроструктурой. С другой стороны, наибольший разброс был получен для металла с накопленным повреждением после длительной эксплуатации.

В то же время в соответствии с [16] твердость при вдавливании отражает остаточную напряженность металла. Таким образом, уменьшение разброса значений твердости может быть результатом микроструктурной гомогенизации, в том числе и за счет выравнивания ОН. Чтобы проанализировать данные измерений твердости, представленные в таблице, следует вычислить относительную величину $\sigma_\mu = \sigma/\mu$, где σ – среднее квадратическое отклонение твердости; μ – ее среднее значение. Результаты этой оценки приведены на рис. 7. Видно, что для образца, обработанного ИЭТ, наблюдается уменьшение разброса значений твердости.

Таким образом, можно предположить, что основным механизмом, ответственным за уменьшение скорости коррозии стали 45, является гомогенизация поверхностного напряженного состояния в результате стимулированного ИЭТ снижения локальных поверхностных ОН. При этом необходимо



Рис. 7. Изменение относительной величины σ_μ для образца в зависимости от его состояния: 1 – исходное; 2 – после обработки ИЭТ.

также учитывать эффект возможного выравнивания микроструктуры металла. Аналогичные результаты были получены при обработке ИЭТ стали HSLA и алюминиевого сплава 5182 [3]: режимы обработки, которые обеспечивали максимальное повышение коррозионной стойкости, показывают наименьший разброс значений твердости.

Выводы

1. Обработка ИЭТ образцов из стали 45 существенно уменьшает скорость их коррозии. Это подтверждается снижением потери (убыли) веса обработанных образцов, вследствие чего их прочность оказывается выше прочности образцов без обработки.

2. Возможным механизмом снижения скорости коррозии стали 45 в результате обработки ИЭТ является выравнивание напряженного состояния и микроструктуры в ее поверхностных слоях.

Автор выражает благодарность д-ру А. Крисанту (A. Chrysanthou, University of Hertfordshire, Hatfield, UK) за помощь в проведении коррозионных испытаний.

Резюме

Наведено результати статичних випробувань на розтяг зразків зі сталі 45 після витримки протягом 100 годин у корозійному середовищі. Показано, що завдяки попередній обробці зразків імпульсним електричним струмом високої густини знижується швидкість корозії металу, в результаті чого їх міцність є вищою за міцність зразків без обробки.

1. Koch G. C., Brongers M. P., Thompson M. P., et al. Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States, Report No. FHWA-RD-01-156, Federal Highway Administration, Washington, DC, 2002.
2. Бабуцкий А. И., Крисанту А., Иоанну Дж. Влияние обработки импульсным электрическим током на коррозию металлических конструкционных материалов // Пробл. прочности. – 2009. – № 4. – С. 62 – 68.

3. Babutsky A., Chrysanthou A., Ioannou J., and Mamuzic I. Correlation between the corrosion resistance and the hardness scattering of structural metals treated with a pulse electric current // Mater. Technol. – 2010. – **44**, No. 2. – P. 99 – 102.
4. Баранов Ю. В., Троицкий О. А., Авраамов Ю. С., Шляпин А. Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
5. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2008. – 504 с.
6. Володин В. Л., Тхай В. Д., Коньков Ю. Д. и др. Исследование импульсных эффектов на сопротивление коррозии металлических и биметаллических материалов // Изв. вузов. Черн. металлургия. – 2002. – № 6. – С. 17 – 20.
7. Bingyan Fang, Jianqiu Wang, Suhong Xiao, et al. Stress corrosion cracking of X-70 pipeline steels by eletropulsing treatment in near-neutral pH solution // J. Mater. Sci. – 2005. – **40**. – P. 6545 – 6552.
8. Жук Н. П. Курс коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1968. – 408 с.
9. Vasil'ev V. Yu., Sergeeva T. K., Baldokhin Yu. V., et al. Internal stresses, corrosion and electrochemical behavior in soils, and stress corrosion of pipe steels // Protect. Metals. – 2002. – **38**, No. 2. – P. 166 – 171.
10. Van Boven G., Chen W., and Rogge R. The role of residual stress in neutral pH stress corrosion cracking of pipeline steels. Pt. I: Pitting and cracking occurrence // Acta Mater. – 2007. – **55**. – P. 29 – 42.
11. Oltra R. and Vignal V. Recent advances in local probe techniques in corrosion research – analysis of the role of stress on pitting sensitivity // Corr. Sci. – 2007. – **49**. – P. 158 – 165.
12. Liu C. R. and Yang X. The scatter of surface residual stresses produced by face-turning and grinding // Mach. Sci. Technol. – 2001. – **5**. – Issue 1. – P. 1 – 21.
13. Степанов Г. В., Бабуцкий А. И., Мамеев И. А. и др. Экспериментальная оценка влияния импульсного электрического тока на остаточные напряжения в соединении композит–медь // Пробл. прочности. – 2008. – № 4. – С. 79 – 86.
14. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.
15. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л., Недосека С. А. Контроль текущего состояния металла труб действующих газопроводов. Метод исследования и результаты // Там же. – 2003. – № 2. – С. 29 – 36.
16. Frankel J., Abbate A., and Scholz W. The effect of residual stresses on hardness measurements // J. Exper. Mech. – 1993. – **33**. – P. 164 – 168.

Поступила 10. 02. 2010