

ИСПЫТАНИЕ ОБРАЗЦОВ НА ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОПРАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СВАРНЫХ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДНЫХ ТРУБ

Ю.И. Пашков, Ю.В. Безганс

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Проведен анализ установок испытаний падающим грузом, используемых для проведения исследований и приёмо-сдаточных испытаний по оценке трещиностойкости сварных газонефтепроводных труб по критерию волокна в изломе образца и по другим параметрам. Для этого на трубных и металлургических заводах используются установки испытаний падающим грузом, изготавливаемые на иностранных фирмах Instrom, Imatek и другие. В России установки испытаний падающим грузом для трубной продукции не изготавливаются.

Некоторые установки испытаний падающим грузом (фирма Imatek) поставляются с автоматической системой записи процесса разрушения образца, позволяющей определять максимальную разрушающую нагрузку, энергетические параметры разрушения (общую работу разрушения, удельную работу распространения трещины), скорость распространения трещины и другие параметры разрушения образца. Это позволяет использовать оборудование для реализации количественного метода оценки трещиностойкости газонефтепроводных труб. Установки испытаний падающим грузом комплектуются охлаждающими камерами для охлаждения образцов до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также приспособлением для нанесения надрезов в образце. Установки испытаний падающим грузом позволяют испытывать образцы из высокопрочной стали до K100, толщиной до 50 мм. Оборудование фирмы Imatek имеет значительные преимущества перед фирмой Instrom: большая производительность, компьютерная система регистрации параметров разрушения, испытание образцов из стали с прочностью K100 и выше и толщиной до 50 мм и др.

Проведены исследования по анализу процессов разрушения крупногабаритного образца на установке испытаний падающим грузом, близкого по геометрическим параметрам к пробе DWTT. Вскрыта и установлена сложная природа образования волокна в изломе образца при динамическом нагружении, зависящая от вязкости материала, скорости трещины в образце, податливости нагружаемой системы и других факторов. Без устранения выявленных недостатков пробы DWTT становится очевидной нецелесообразность использования данной пробы для проведения приёмо-сдаточных испытаний по оценке трещиностойкости сварных газопроводных труб.

Ключевые слова: пластичность, сварные соединения, трубы большого диаметра, испытания падающим грузом.

Согласно требованиям нормативных актов в заводской практике изготовления сварных газонефтепроводных труб их уровень трещиностойкости оценивается величиной ударной вязкости (a_n), процентом волокна в изломе образца (B) и величиной раскрытия трещины (δ_c). Величина a_n определяется при испытании стандартных образцов на маятниковых копрах, величина B – при испытании плоских образцов натурной толщины основного металла на вертикальных копрах, величина δ_c – при статических испытаниях специального образца.

В рамках настоящей работы анализируются испытания плоских образцов основного металла труб на вертикальном копре согласно требованиям стандарта [1], так называемая проба DWTT и результаты исследований специального образца на вертикальном копре для количественной оценки трещиностойкости сварных труб согласно разработанной методике [2].

Метод испытаний плоского образца основного металла труб согласно стандарту [1] предназначен для определения сопротивляемости распространению трещины основного металла газопроводной трубы диаметром 508 и более, толщиной стенки более 7,5 мм. Метод основан на разруше-

нии образца с концентратором падающим бойком на копре при комнатной и пониженной температурах и определением количества вязкой составляющей в изломе образца в процентах. Нормативную величину B устанавливают согласно требованиям нормативных актов на трубы. Определение других характеристик трещиностойкости металла (энергия разрушения образца и её составляющие, разрушающая нагрузка, скорость распространения трещины и др.) не предусмотрено.

Для проведения испытаний изготавливают образцы размером $300 \times 75 \times t$ мм (t – толщина) с пресованным надрезом глубиной 5 мм. Допускается образец толщиной более 19 мм механически утонять до 19 мм, класс прочности испытываемых материалов K30–K100.

Копры Imatek изготавливаются с запасом энергии от 25 до 100 кДж, начальная скорость падения ударника от 4,5 до 9,0 м/с, общая высота копра от 5,5 до 7,5 м, масса ударника от 500 до 2500 кг, возможная температура испытания $+20 \dots -80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Данные образцы испытываются при динамическом нагружении на вертикальных копрах, изготавливаемых на иностранных фирмах Instrom, Imatek и других. В России подобных копров не изготавливают.



Рис. 1. Конструкция вертикального копра, изготавливаемая фирмой Imatek

Некоторые копры (фирма Imatek) поставляются с автоматической системой записи процесса разрушения образца, позволяющей определять максимальную разрушающую нагрузку, энергетические параметры разрушения (общую работу разрушения, удельную работу распространения трещины), скорость распространения трещины и другие параметры разрушения образца. Это позволяет использовать копры для реализации количественного метода оценки трещиностойкости газонефте-

проводных труб. Копры комплектуются камерами для охлаждения образцов до -80°C , а также приспособлениями для нанесения надрезов в образце. Копры позволяют испытывать образцы из высокопрочной стали до K100 и толщиной до 50 мм, из которой изготавливают современные высокопрочные сварные газонефтепроводные трубы.

Вертикальные копры фирмы Imatek имеют значительные преимущества перед копрами фирмы Instron: большая производительность, компьютерная система регистрации параметров разрушения, испытание образцов из стали с прочностью K100 и выше и толщиной до 50 мм и др.

Общий вид конструкции вертикального копра фирмы Imatek представлен на рис. 1.

Испытываемый образец устанавливается на опоры и нагружается по схеме «чистый изгиб». Комплектуется копр Imatek качественной системой измерений параметров разрушений образца (максимальная нагрузка, энергия разрушения, скорость падения ударника и скорость трещины). Записывается диаграмма разрушения (рис. 2). Для охлаждения образцов поставляется термокамера.

Проведенный анализ работы вертикальных копов для испытания образцов по схеме нагружения «чистый изгиб» позволил выявить целый ряд их методических недостатков:

1. Разрушения магистральных трубопроводов происходят в поле растягивающих напряжений на любой стадии разрушения. Образец, нагружаемый по схеме «чистый изгиб», создаёт в образце пластическую сжатую зону, которая при реальном разрушении трубопровода отсутствует.

2. Испытания образцов на вертикальном копре не учитывают влияние масштабного эффекта (высота, длина и толщина образца) на результаты трещиностойкости основного металла трубы.

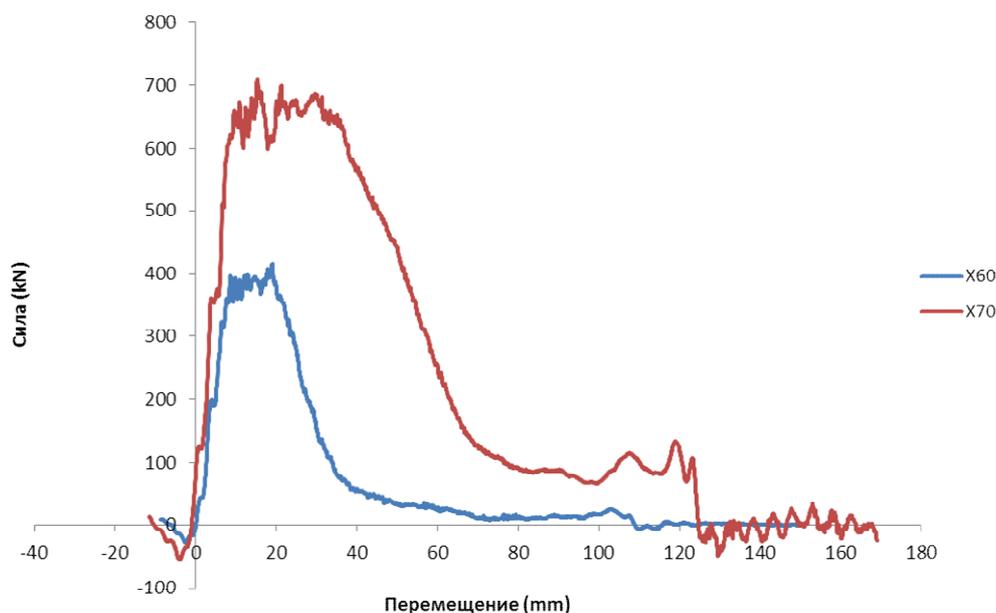


Рис. 2. Диаграмма деформирования и разрушения образца DWTT на вертикальном копре (Imatek)

3. Метод испытания образцов на копре не предусматривает испытание зон (ЗТВ и металла шва) сварного соединения трубы.

4. При испытании плоского образца на вертикальном копре не учитывается влияние скорости распространения трещины и энергии упругой деформации системы «образец – копёр» на результаты испытаний.

Следует заметить, что авторы пробы DWTT, группа исследователей Д.М. МакКлур, А.Р. Даффи, Р.Д. Айбер [3], на первоначальном этапе исследований исходили из выявленной аналогии по установлению корреляции между натурными испытаниями труб и плоских образцов по виду излома. В дальнейшем [4] эти же авторы при испытании другой серии труб уже не смогли установить чёткую взаимосвязь между долей волокна в изломе образцов и волокна в изломе разрушенных труб.

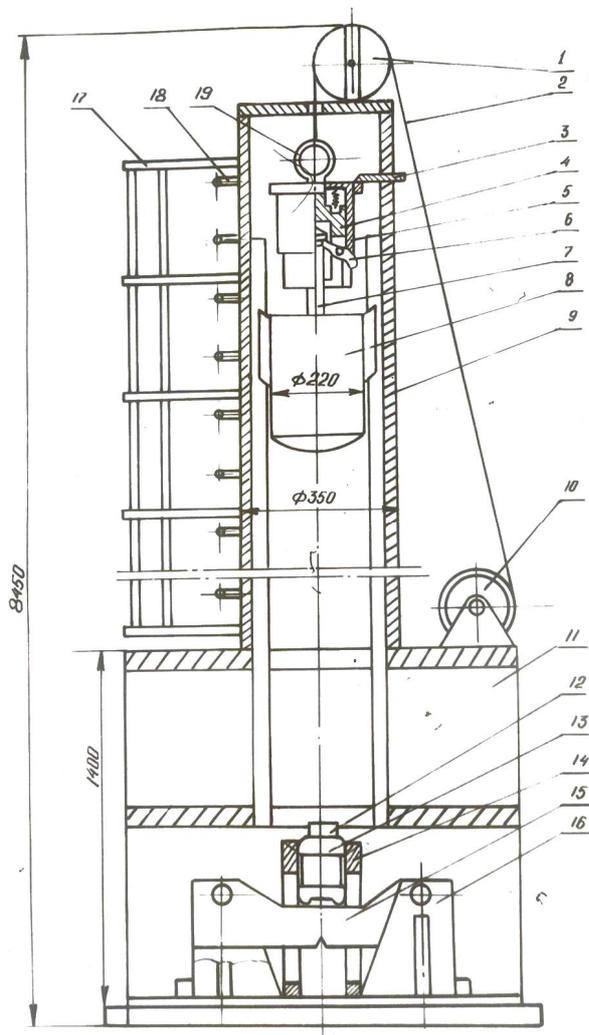


Рис. 3. Вертикальный копёр для испытания плоского образца с осциллографированием процесса разрушения: 1 – блок; 2 – трос; 3 – ограничитель; 4–7 – захватно-сбрасывающее устройство ударника; 8 – ударник; 9 – труба $\varnothing 350$ мм; 10 – лебедка; 11 – основание копра; 12 – крешер; 13 – динамометр; 14 – ограничитель ударника; 15 – образец; 16 – приспособление

Поэтому потребовалось проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований по изучению физических процессов разрушения пробы DWTT. Для этой цели использовали результаты испытаний плоских образцов по схеме нагружения «изгиб – растяжения» на специально разработанном вертикальном копре (рис. 3) с осциллографированием процесса разрушения образца.

Это позволило исследовать кинетику процесса разрушения крупногабаритного образца, по геометрическим размерам совпадающим с пробой DWTT. Этот образец разработан для реализации метода расчётной оценки трещиностойкости сварных труб, газонефтепроводных труб [2]. Данный образец в отличие от стандартного образца [1] принципиально отличается по следующим параметрам [5, 6]:

- имитация процесса зарождения трещины до критического размера в статическом режиме нагружения на специальном испытательном стенде и распространение трещины на вертикальном копре;

- исключение влияния масштабного фактора на получаемые параметры разрушения образца;

- испытание образцов позволяет определять на одном образце следующие характеристики трещиностойкости материала:

- силовые (максимальная разрушающая нагрузка, кг);

- энергетические (общая энергия разрушения и удельная величина работы распространения трещины при скорости трещины 400 м/с);

- кинетические (скорость распространения трещины, м/с);

- испытание образца размером $305 \times 75 \times t$ мм натурной толщины или с реальным сварным соединением;

- образец нагружается по схеме «изгиб с растяжением». Исключается пластическая сжатая зона в образце;

- весь процесс испытания записывается на осциллограмму в координатах «время – нагрузка».

В процессе испытаний плоских образцов с реальной толщиной и осциллографированием процесса разрушения на вертикальном копре получена серия образцов со смешанным изломом с чётко выраженными участками кристаллических и вязких зон в изломе (рис. 4).

На основе энергетического подхода кинетика разрушения определяется соотношением уровней сопротивляемости материала распространению трещины и высвобождаемой энергии упругой деформации. Анализ изменения этих факторов в зависимости от длины трещины при испытании данных плоских образцов позволил установить основные причины смены характера излома.

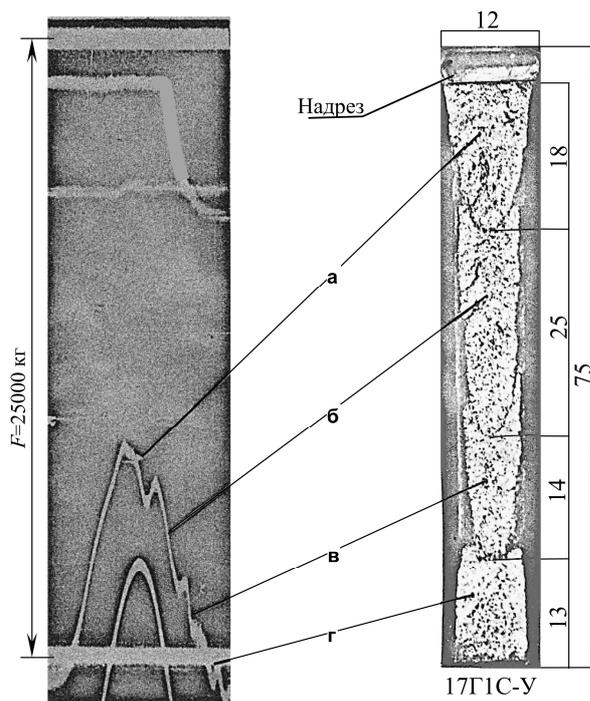


Рис. 4. Сопоставление характера излома плоского образца из стали 17Г1С-У толщиной 12,0 мм с записанной осциллограммой процесса разрушения на вертикальном копре: а, б, в, г – хрупкие зоны в изломе образца

Величина действующего усилия F испытываемого образца в зависимости от длины трещины l изменяется по кривой, имеющей максимум (рис. 5, а, кривая 1) при длине трещины l_1 . Характер изменения податливости нагружаемой системы λ в зависимости от l с учётом разработок Я. Немеца [7] выражается кривой 2. Отсюда следует, что запас энергии упругой деформации системы A_y с ростом длины трещины изменяется по кривой 3, также имеющей максимум, при котором

$$\frac{dA_y}{dl} = F\lambda \frac{dF}{dl} + \frac{F^2}{2} \frac{d\lambda}{dl} = 0.$$

Поскольку второе слагаемое при принятом характере $\lambda(l)$ всегда положительно, то это равенство удовлетворяется лишь при отрицательном значении dF/dl , то есть при спаде усилия. Следовательно, максимальное значение зависимости $A_y(l)$ имеет место при $l_2 > l_1$. На участке $l \leq l_2$ происходит накопление энергии упругой деформации, и величина высвобождаемой энергии равна нулю. При дальнейшем росте трещины $l > l_2$ наблюдается уменьшение A_y , а разница между максимальным значением A_y^{\max} и текущим A_y значениями характеризует величину высвобождаемой энергии A_y^B , которая выражается кривой 4 (рис. 5, а).

Приращение высвобождаемой энергии по длине трещины dA_y^B/dl можно представить в виде кривой 1 (рис. 5, б). Сопоставим последнюю зависимость с сопротивляемостью материала разруше-

нию, характеризуемую приращением работы распространения трещины по длине dA_p/dl . Согласно работе [7], для плоского образца сопротивляемость материала может быть выражена кривой 2. В точке B пересечения этих кривых имеет место соответствие высвобождаемой энергии и затрачиваемой работы. Трещина с этого момента получает возможность распространяться без подвода энергии извне. Абсцисса этой точки характеризует длину критической трещины $l_{кр}$.

При длине трещины $l > l_{кр}$ фактор,двигающий трещину, dA_y/dl превышает сопротивляемость материала dA_p/dl . В результате трещина двигается с положительным ускорением, а её изменение скорости может быть представлено кривой 3. Полагая, что сопротивляемость материала с ростом скорости трещины понижается, изменение dA_p/dl между точками B, B' и B'' можно представить пунктирной кривой 4.

При достижении скорости критического значения $V_p^{кр}$, зависящей от свойства материала, температуры и напряжённого состояния, произойдёт смена характера излома с вязкого на хрупкий и наоборот. Для ситуации, рассмотренной на рис. 5, наблюдаемая в образце протяжённость кристаллического излома $l_{хр}$ определяется разностью абсцисс точек C и C' .

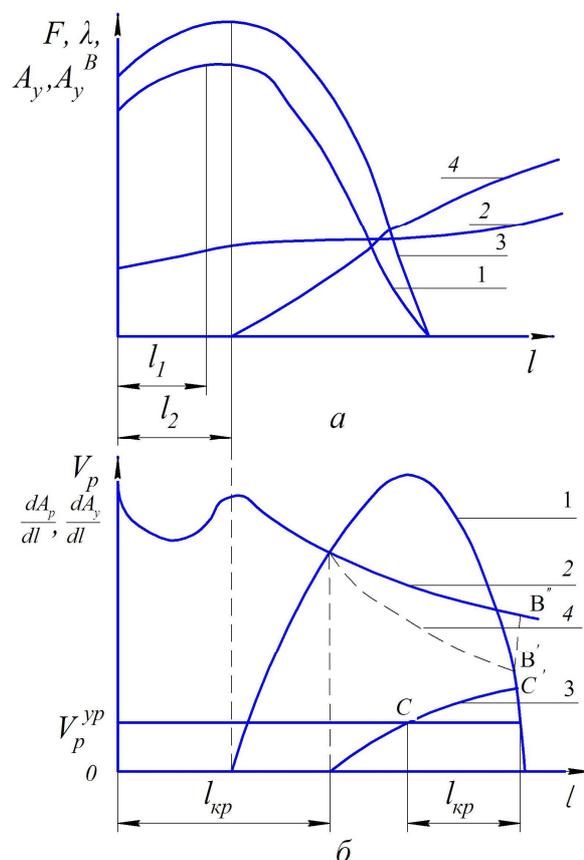


Рис. 5. Схематические кривые к анализу кинетики разрушения плоского образца на вертикальном копре

Таким образом, протяжённость кристаллического излома в образце на вертикальном копре является сложной функцией, зависящей не только от вязкости материала, но и от чувствительности этого параметра к скорости трещины, от характера изменения кривых $F(\ell)$ и $\lambda(\ell)$, а также от значения критической скорости трещины $V_p^{кр}$, в свою очередь зависящего от ряда других факторов.

Такая сложная природа образования вида излома образца не позволяет трактовать его как критерий вязкости материала и подтверждает сомнения относительно правомочности использования вида излома в качестве количественного критерия оценки трещиностойкости сварных труб и других конструкций.

Литература

1. ГОСТ 30456–97. *Металлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Метод испытания на ударный изгиб.*
2. *Метод расчётно-экспериментальной оценки трещиностойкости газонефтепроводных труб:*

межведомств. руководящий док. / Н.А. Махутов, В.В. Харинковский, А.Н. Моношков, Ю.И. Пашков. – Челябинск; М., 2003 – С. 1–13.

3. McClure, G.M. Fracture Resistance in Line Pipe / G.M. McClure, A.R. Duffy, R.J. Eiber // *Trans. ASME.* – 1965. – Vol. B87, no. 3. – P. 265–278.

4. Айбер, Р.Д. *Прикладное значение результатов испытаний падающим грузом и ударных испытаний образцов с V-образным надрезом / Р.Д. Айбер, А.Р. Даффи, Д.М. Мак Клур // Ударные испытания металлов. – М.: Мир, 1973. – 329 с.*

5. Рахман, М.З. *К определению параметров хрупкого разрушения по виду излома образцов / М.З. Рахман, А.Н. Моношков, Ю.И. Пашков // Прогрессивные методы сварки в тяжёлом машиностроении и наплавки в чёрной металлургии. – Жданов: ЖМИ, 1977. – С. 173–174.*

6. Пашков, Ю.И. *О природе порога хладноломкости металлов / Ю.И. Пашков // Заводская лаборатория. – 1990. – № 12. – С. 87–90.*

7. Немец, Я. *Жесткость и прочность стальных деталей / Я. Немец. – М.: Машиностроение, 1970. – 528 с.*

Пашков Юрий Иванович, д-р техн. наук, ведущий аналитик кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; pashkovyi@susu.ac.ru.

Безганс Юрий Викторович, преподаватель кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; smoke200483@mail.ru.

Поступила в редакцию 14 января 2015 г.

DROP WEIGHT IMPACT TESTING OF SAMPLES FOR EVALUATING THE FRACTURE TOUGHNESS OF WELDED GAS AND OIL PIPES

Yu.I. Pashkov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, pashkovyi@susu.ac.ru,
Yu.V. Bezgans, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, smoke200483@mail.ru

The analysis of the drop weight impact equipment used to evaluate the fracture toughness of welded gas and oil pipes by the criterion of fiber in the sample fracture was made. Drop Weight Impact Testers used at Russian pipe and metallurgic plants are exported machines from foreign firms Instrom, Imatek and others. In Russia such testers are not produced.

Some Drop Weight Impact Testers (Imatek company) have the option of automatic recording of sample destruction and allow determining the maximum destructive load, energy parameters of destruction (total work of fracture, the specific work of crack propagation), the velocity of crack propagation. This allows using the equipment to implement the method for quantitative evaluation of fracture toughness for gas and oil pipes. Drop Weight Impact Testers are equipped with cooling chambers for cooling samples up to -80 C and with a device to make cuts on samples. Drop Weight Impact Testers allow to test samples of high-strength steel up to K100 with thickness up to 50 mm. Testers of Imatek have significant advantages over the testers of Instrom: they show higher productivity, they have computer system to register fracture parameters, they can test specimens of steel with the durability equal to K100 and above and with the thickness of up to 50 mm.

The destruction of a large sample similar in geometry to DWTT sample was made using Drop Weight Impact Testers. The complex nature of fibers in the fracture of the specimen under dynamic load was determined.

It depends on the viscosity of the material, on the speed of cracks in the sample, on the flexibility of loading system. Without correcting DWTT samples it is not sensible to use these samples to conduct acceptance tests for the evaluation of fracture toughness of welded gas pipes.

Keywords: toughness, joint, tubes of the big diameter, trials by a dropping weight.

References

1. GOST 30456–97. *Metalloproduksiya. Prokat listovoy i truby stal'nye. Metod ispytaniya na udarnyy izgib.* [Interstate Standard 30456–97. Metal Production. Rolled Steel and Tubes. Methods of Blow Bending Tests].
2. Makhutov N.A., Kharinovskiy V.V., Monoshkov A.N., Pashkov Yu.I. *Mezhvedomstennyy rukovodyashchiy dokument "Metod raschetno-eksperimental'noy otsenki treshchinostoykosti gazonefteprovodnykh trub"* [Inter-Departmental Guidance Document "A Method of Calculation and Experimental Evaluation of Fracture Toughness of Gas and Oil Pipes"]. Chelyabinsk; Moscow, 2003.
3. McClure G.M., Duffy A.R., Eiber R.J. Fracture Resistance in Line Pipe. *Trans. ASME*, 1965, vol. B87, no. 3, pp. 265–278.
4. Eiber R.J., Duffy A.R., McClure G.M. Significance of the Drop-Weight Tear Test and Charpy V-Notch Impact Test Results. *Impact Testing of Metals. ASTM Special Technical Publication 466*. Philadelphia, ASTM, 1970, pp. 181–191. doi: 10.1520/STP32062S.
5. Rakhman M.Z., Monoshkov A.N., Pashkov Yu.I. [To the Determination of Parameters of Brittle Fracture from the Appearance of Fracture Surface]. *Progressivnye metody svarki v tyazhelom mashinostroenii i naplavki v chernoy metallurgii* [Advanced Methods of Welding in Heavy Machine Building and Deposition in Ferrous Metallurgy]. Zhdanov, ZhMI Publ., 1977, pp. 173–174. (in Russ.)
6. Pashkov Yu.I. [On the Nature of Ductile-Brittle Transition of Metals]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1990, no. 12, pp. 87–90. (in Russ.)
7. Nemets Ya.K. *Zhestkost' i prochnost' stal'nykh detaley* [The Stiffness and Strength of Steel Parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 528 p.

Received 14 January 2015

БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Пашков, Ю.И. Испытание образцов на вертикальных копрах для оценки трещиностойкости сварных газонефтепроводных труб / Ю.И. Пашков, Ю.В. Безганс // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 113–118.

REFERENCE TO ARTICLE

Pashkov Yu.I., Bezgans Yu.V. Drop Weight Impact Testing of Samples for Evaluating the Fracture Toughness of Welded Gas and Oil Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 113–118. (in Russ.)
