

УДК 656. 259. 2

ВЛИЯНИЕ ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИИ КОПРА НА ПОКАЗАТЕЛИ ИСПЫТАНИЯ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ ВИСОКОВЯЗКИХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

ЛЮЧКОВ А. Д.¹, к. ф-м. н., вед. н. с.,
ВАХРУШЕВА В. С.^{2*}, д. т. н., проф.,
ПЕМОВ И. Ф.³, с. н. с.,
МАЙБОРОДА О. Ю.⁴, маг.,
ИВАНОВА А. А.⁵, маг.

¹ Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады», ул. Писсаржевского, 1-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (097) 075-51-79

^{2*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, e-mail: vs062@ukr.net

³ Филиал Центрального научно-исследовательского института черной металлургии, Мариуполь, Украина

⁴ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина

⁵ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина

Аннотация. Постановка проблемы. Рассмотрены методологические вопросы, связанные с испытаниями падающим грузом (ИПГ) листового проката и труб из высоковязкой стали для магистральных газопроводов высокого давления. Отмечено несовершенство действующих стандартов в части выбора значений запасенной энергии копра, обеспечивающих корректное проведение испытаний металла всего размерного сортамента. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений запасенной энергии копра для испытания металла толщиной 25 мм и более. **Цель статьи** – оценка влияния запасенной энергии копра на результаты ИПГ по показателям количества вязкой составляющей и поглощенной энергии разрушения полнотолщинных образцов высоковязких трубных сталей, широко применяемых в современном строительстве газопроводов высокого давления. **Материал и методика.** Исследовали листы и основной металл труб классов прочности X65, X70 и X80 различной толщины, изготовленных по технологии термомеханической прокатки. Испытания падающим грузом проводили на копрах фирмы Zwick различной мощности. **Результаты.** Уточнены границы применения рекомендаций стандартов API RP5L3 и EN10274 по выбору величины запасенной энергии копра при испытании падающим грузом высоковязких трубных сталей. Рекомендации применимы только для сталей толщиной менее 25 мм. Даны рекомендации по выбору оптимальной величины запасенной энергии копра при ИПГ высоковязких трубных сталей толщиной 25 мм и более. **Научная новизна.** Оценено влияние запасенной энергии копра на результаты ИПГ высоковязких трубных сталей. **Практическая значимость.** Рекомендации по выбору величины запасенной энергии копра ИПГ повышают точность измерения и надежность оценки сопротивления разрушению газопроводов.

Ключевые слова: испытание падающим грузом; запасенная энергия копра; количество вязкой составляющей; поглощенная энергия; упрочнение металла; высоковязкая сталь

ВПЛИВ ЗБЕРЕЖЕНОЇ ЕНЕРГІЇ КОПРА НА ПОКАЗНИКИ ВИПРОБУВАННЯ ПАДАЮЧИМ ВАНТАЖЕМ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ

ЛЮЧКОВ А. Д.¹, к. ф-м. н., вед. н. с.,
ВАХРУШЕВА В. С.^{2*}, д. т. н., проф.,
ПЕМОВ І. Ф.³, с. н. с.,
МАЙБОРОДА О. Ю.⁴, маг.,
ІВАНОВА А. О.⁵, маг.

¹ Державне підприємство «Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади», вул. Писсаржевського, 1-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (097) 075-51-79

^{2*} Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, email: vs062@ukr.net

³ Філія Центрального науково-дослідного інституту чорної металургії, Маріуполь, Україна

⁴ Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна

академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна

Анотація. Постановка проблеми. Розглянуто методологічні питання, пов'язані з випробуваннями падаючим вантажем (ВІВ) листового прокату і труб із високов'язкої сталі для магістральних газопроводів високого тиску. Відмічено недосконалість діючих стандартів у частині вибору значень збереженої енергії копра, що забезпечують коректне проведення випробувань металу всього розмірного сортаменту. Дано рекомендації щодо вибору оптимальних значень збереженої енергії копра для випробування металу товщиною 25 мм і більше. **Мета.** Оцінка впливу збереженої енергії копра на результати ВІВ за показниками кількості в'язкої складової і поглиненої енергії руйнування повнотовщинних зразків високов'язких трубних сталей, широко застосовуваних у будівництві газопроводів високого тиску. **Матеріал і методика.** Дослідили листи та основний метал труб класів міцності X65, X70 і X80 різної товщини, виготовлених за технологією термомеханічної прокатки. Випробування падаючим вантажем проводили на копрах фірми Zwick різної потужності. **Результати.** Уточнено межі застосування рекомендацій стандартів API5L3 і EN10274 за вибором величини запасеної енергії копра під час випробування падаючим вантажем високов'язких трубних сталей. Рекомендації застосовні тільки для сталей товщиною менше 25 мм. Дано рекомендації щодо вибору оптимальних величин запасеної енергії копра при ВІВ високов'язких трубних сталей товщиною 25 мм і більше. **Наукова новизна.** Оцінено вплив збереженої енергії копра на результати ВІВ високов'язких трубних сталей. **Практична значимість.** Рекомендації щодо вибору величини запасеної енергії копра ВІВ підвищують точність вимірювання та надійність оцінки опору руйнуванню газопроводів.

Ключові слова: випробування падаючим вантажем; запасена енергія копра; кількість в'язкої складової; поглинена енергія; зміцнення металу; високов'язка сталь

INFLUENCE OF AVAILABLE IMPACT ENERGY OF THE TESTING MACHINE ON DROP WEIGHT TEAR TEST CHARACTERISTICS OF HIGH TOUGHNESS PIPELINE STEELS

LYUCHKOV A.D.¹, *Cand. Sc. (Phys.-Math.), Lead. Res. Fell.*,

VAKHRUSHEVA V.S.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

PEMOV I.F.³, *Sen. Res. Fell.*,

MAIBORODA O.Yu.⁴, *Master*,

IVANOVA A.A.⁵, *Master*

¹ State Enterprise "Research and design-technology institute of the tube industry Ya.Yu. Osada by name", Pissarzhevsky Str., 1-a, Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38(097)075-51-79

^{2*} Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: vs062@ukr.net

³ Branch of Central Scientific Research Institute of Ferrous Metallurgy, Mariupol, Ukraine

⁴ Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine

⁵ Department of Materials and Materials Processing, State Higher Education Establishment "Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine

Abstract. Problem statement. The methodological questions connected to Drop Weight Tear Test (DWTT) of high toughness plates and pipes of high pressure gas pipelines are considered in this article. The imperfection of operating standards regarding to the choice of the values of available impact energy providing correct carrying out tests of any size of steel is marked. **Purpose.** Appraisal of influence of the available impact energy on the results of DWTT on indicators of shear fraction quantity and the absorbed energy of destruction the full-thickness samples high-toughness pipe steels from among the most widely applied in modern construction of gas pipelines of high pressure. **Material and methodology.** Plates and basic metal of pipes grade X65, X70 and X80 different thickness were researched. DWTT were carried out on Zwick test machines of various capacities. **Results.** Boundaries of application of recommendations of the API5L3 and the EN10274 standards at the choice of available energy value of impact testing machine to DWTT of pipe steels with thickness 25 mm and less. **Scientific novelty.** In this article was estimated influence of the available impact energy on the results of DWTT of high toughness pipe steels. **Practical value.** Recommendations about the choice available impact energy on results of DWTT will increase of test exactness and reliability of resistance appraisal of gas pipelines to destruction.

Keywords: drop weight tear test; available impact energy of the testing machine; shear fraction quantity; absorbed energy; metal hardening; high toughness

Введение

С началом широкого применения в строительстве магистральных газопроводов высокого давления труб, изготовленных из микролегированных высоковязких сталей термомеханической прокатки, возникла новая проблема. Установлено, что испытания падающим грузом (ИПГ) листового проката и труб из таких сталей зачастую дают отрицательные результаты по количеству вязкой составляющей в изломе, являющейся показателем эксплуатационной надежности газопровода. Это явление в современной литературе связывают с упрочнением металла образцов вследствие пластической деформации, возникающей при ударе молота испытательного копра [1–3]. Упрочнение тем значительнее, чем больше запасенная энергия копра, что иллюстрирует рисунок 1, на котором показаны результаты предварительной оценки изменения твердости металла образцов ИПГ стали X80 толщиной 27,7 мм в зоне пластической деформации от удара бойка копра.

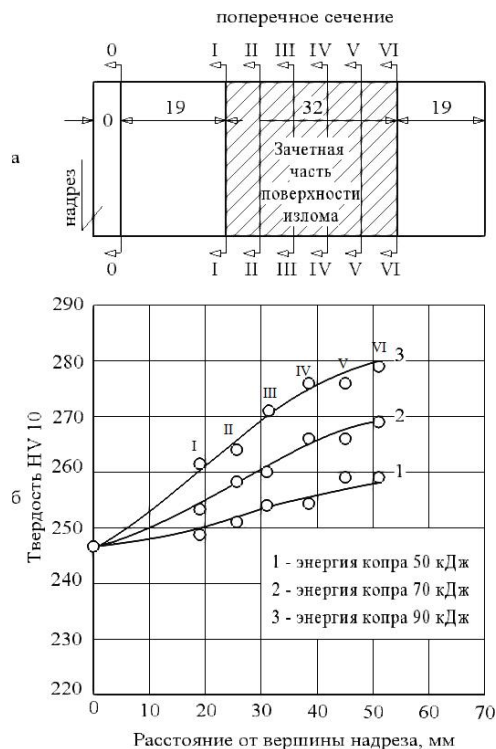


Рис. 1. Влияние запасенной энергии копра на упрочнение металла при пластической деформации от удара бойка. Сталь X80 толщиной 27,7 мм: а – схема разрезки образцов для измерения твердости; б – изменение твердости в плоскости поперечных сечений I–VI по высоте поверхности излома образцов ИПГ / Fig. 1. Influence of the reserved energy of the impact testing machine on hardening of metal at plastic deformation from blow quickly. X80 steel 27,7 mm thick: a – the scheme of cutting of samples for measurement of hardness; б – modifications of hardness in the plane of cross sections I–VI on height of a surface of a break of samples of the FWT

Однако влияние упрочнения стали на показатели ИПГ изучено недостаточно.

Цель статьи

Цель данной работы состоит в оценке влияния запасенной энергии копра на результаты ИПГ по показателям количества вязкой составляющей в изломе и поглощенной энергии разрушения полнотолщинных образцов высоковязких трубных сталей из числа наиболее широко применяемых в современном строительстве газопроводов высокого давления.

Материал и методика

Для исследования выбраны высоковязкие ферритно-бейнитные стали термомеханической прокатки, характеристики которых приведены в таблице. Испытания проводили на копрах Zwick с максимальной запасенной энергией 60 и 100 кДж в соответствии с требованиями стандарта API RP5L3. Испытывали стандартные образцы с прессованным надрезом, по два образца на точку. В расчет принимали средние значения из двух испытаний.

Таблица

Основные характеристики исследованных сталей / The main characteristics of the studied steels

№ п/п	Толщина, мм	Категория прочности	Поглощенная энергия Шарпи–V, Дж
1	17,5	X80	304
2	27,7	X80	315
3	21,6	X70	250
4	25,8	X70	400
5	32,6	X70	360
6	39,0	X65	310

Температура испытаний составляла $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствовало температуре сдаточных испытаний по нормативной документации на поставку труб и толстолистового проката.

Результаты исследования и их обсуждение

Чувствительность показателей ИПГ высоковязких сталей к запасенной энергии копра изучали в работе [4]. Были проведены сравнительные исследования влияния энергии копра на температуру вязко-хрупкого перехода закаленной (QT) и термомеханически обработанной (ТМ) стали. Как оказалось, обе стали обнаруживают повышение температуры вязко-хрупкого перехода с увеличением запасенной энергии копра. Но если изменение температуры перехода стали ТМ склонно к насыщению, когда при увеличении энергии копра выше определенного уровня температура перехода стабилизируется, то у QT стали температура перехода повышается непрерывно.

По мнению авторов, этот результат очень важен, поскольку запасенная энергия не регламентируется в действующих стандартах на ИПГ [5–7]. Последнее не

исключает возможность значительного искажения результатов испытания. В связи с этим в работе [8] указывается на необходимость учета условий испытания и, в частности, учета влияния величины запасенной энергии копра на результаты испытания падающим грузом. Однако стандарты, регламентирующие тест ИПГ, не обеспечивают возможность выбора значений запасенной энергии копра, оптимальных для стали данного состава, толщины и показателей вязкости. Рекомендации зарубежных стандартов [5; 6] позволяют лишь выбрать значения энергии, необходимой для полного разрушения образцов одним ударом копра.

Отечественный стандарт [7] вообще не содержит каких-либо рекомендаций. Имеется лишь требование: «запасенной энергии копра должно хватить для полного разрушения образца за один удар». В стандарте [5] выбор энергии копра осуществляется с помощью графиков (рис. 2), построенных по уравнению Wilkowski для линейного соотношения поглощенной энергии Шарпи-V и энергии ИПГ [9]:

$$\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ} = 3\left(\frac{E}{A}\right)_{Charpy - V} + 63, \quad (1)$$

где E – полная поглощенная энергия; A – площадь разрушения.

В стандарте [6] в тех же целях рекомендуется следующая формула для определения необходимой запасенной энергии копра:

$$E_{REQ} = 5.6(KV) \frac{A_{DWTТ}}{A_{KV}}, \quad (2)$$

где $A_{DWTТ}$ – площадь разрушения образцов ИПГ; A_{KV} – площадь разрушения образцов Шарпи с острым надрезом; KV – поглощенная энергия образцов Шарпи с острым надрезом.

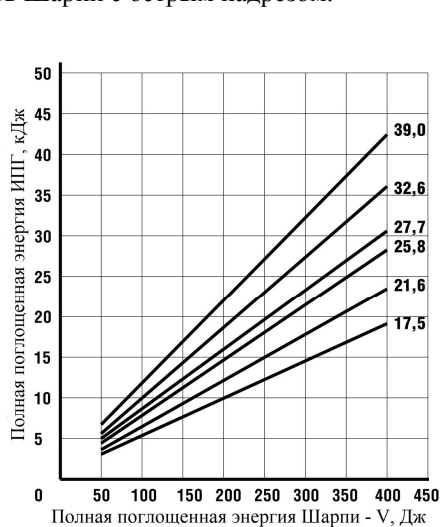


Рис. 2. Соотношение поглощенной энергии ИПГ и Шарпи-V, рассчитанное по линейному уравнению Wilkowski [9] / Fig. 2. Correlation DWTT and Charpy V, calculated on the linear equation Wilkowski [9]

В выражении (2) энергия Шарпи-V и полная энергия ИПГ также связаны линейной зависимостью, которая хорошо описывает поведение простых горячекатаных и нормализованных углеродистых и низколегированных трубных сталей. В реальном соотношении поглощенной энергии Шарпи и ИПГ высоковязких сталей имеет место отклонение значений энергии ИПГ от линейной зависимости.

В [10] исследовали сталь X100 толщиной 16...20 мм. Было показано, что уже при KCV 150 Дж/см² отклонение энергии ИПГ от линейного закона становится заметным, а при KCV 300...350 Дж/см² отклонение значений энергии ИПГ может составить 200...300 Дж/см² или 20...30 %. Отклонение от прямолинейности соотношения поглощенная энергия Шарпи – поглощенная энергия ИПГ было также обнаружено при исследовании стали X70 толщиной 18,3 мм [11]. Приведенные данные свидетельствуют о том, что, если следовать рекомендациям стандартов, ошибка, допущенная при выборе значения запасенной энергии копра, может существенным образом исказить результаты испытаний.

Испытания падающим грузом начинали при максимальных значениях запасенной энергии копра с последующим ее снижением до значений, при которых прекращалось полное разрушение образцов. Результаты испытаний представлены на рисунках 3 и 4, где приведены графики зависимости количества вязкой составляющей и полной поглощенной энергии разрушения образцов ИПГ исследованных сталей.

Как видно из рисунков, на всех графиках наблюдаются участки резкого падения поглощенной энергии, следующие за участками, где количество вязкой составляющей и поглощенная энергия либо не зависят от энергии, запасенной копром, как это имеет место при испытании стали X80 толщиной 17,5 мм (рис. 3 а) и стали X70 толщиной 21,6 мм (рис. 3 б), либо им предшествуют участки, где фрактографический и энергетический показатели ИПГ падают с ростом запасенной энергии. Это сталь X70 толщиной 25,8 мм (рис. 3 в), сталь X80 толщиной 27,7 мм (рис. 4 а), сталь X70 толщиной 32,6 мм (рис. 4 б), и сталь X65 толщиной 39,0 мм (рис. 4 в).

Снижение показателей ИПГ, за которым следует прекращение полного разрушения образцов, обусловлено ростом дефицита подводимой энергии, которой все больше не хватает для обеспечения локальной пластической деформации металла на фронте растущей трещины, и разрушение из вязкого превращается в хрупкое, а затем и вовсе прекращается [12].

Падение количества вязкой составляющей и поглощенной энергии за перегибом на кривых рисунков 3 в и 4 непосредственно связано с упрочнением металла при пластической деформации от удара молота копра, которое становится достаточным для значительного снижения обоих показателей ИПГ всех исследованных сталей,

начиная с толщин 25,8 мм (рис. 3 в). При этом положение максимумов на кривых рисунков 3 в и 4 определяет оптимальную величину запасенной энергии копра, обеспечивающую достижение наиболее высоких значений как количества вязкой составляющей, так и поглощенной энергии.

На рисунках 3 и 4 пунктирными линиями 1 и 2 показаны значения запасенной энергии копра, соответствующие рекомендациям стандартов [5] и [6] соответственно. Видно, что рекомендации стандартов применимы только к высоковязким трубным сталям, упрочнение которых при ударе молота копра невелико и еще не приводит к заметному падению показателей ИПП. В нашем случае это стали X80 и X70 толщиной 17,5 и 21,6 мм соответственно. Для нахождения оптимальных значений запасенной энергии копра при ИПП высоковязких трубных сталей большей толщины необходимы специальные испытания с установлением величины запасенной энергии, обеспечивающей максимальные значения количества вязкой составляющей и полной поглощенной энергии ИПП, аналогичные проведенным в настоящей работе.

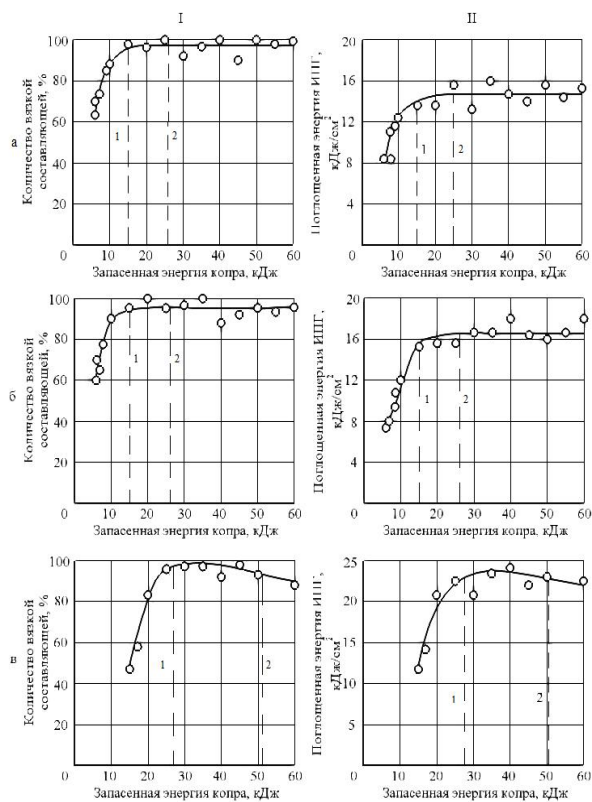


Рис. 3. Влияние запасенной энергии копра на количество вязкой составляющей (I) и полную поглощенную энергию ИПП (II):

а – толстолистовой прокат X80 толщиной 17,5 мм;
б – толстолистовой прокат X70 толщиной 21,6 мм;
в – толстолистовой прокат X70 толщиной 25,8 мм /

Fig. 3. Influence of available impact energy on Shear Fraction quantity (I) and total absorbed energy of DWT (II): a – X80 hot-rolled plate 17,5 mm thick;
b – X70 hot-rolled plate 21,6 mm thick;
c – X70 hot-rolled plate 25,8 mm thick

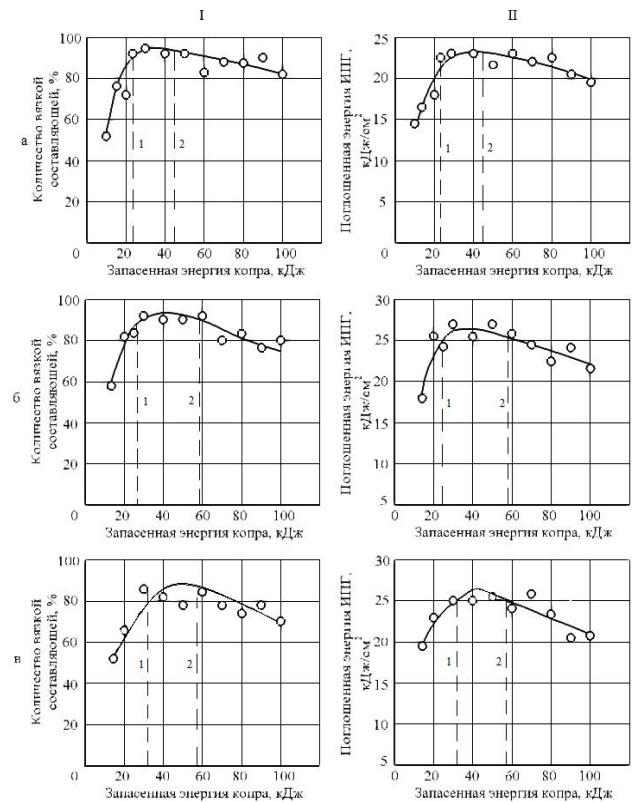


Рис. 4. Влияние запасенной энергии копра на количество вязкой составляющей (I) и полную поглощенную энергию ИПП (II):

а – толстолистовой прокат X80 толщиной 27,7 мм;
б – толстолистовой прокат X70 толщиной 32,6 мм;
в – толстолистовой прокат X65 толщиной 39,0 мм /
Fig. 4. Influence of available impact energy on Shear Fraction quantity (I) and total absorbed energy of DWT (II): a – X80 hot-rolled plate 27,7 mm thick;
b – X70 hot-rolled plate 32,6 mm thick;
c – X65 hot-rolled plate 39,0 mm thick

Выводы

1. Отмечено несовершенство нормативной базы оценки показателей испытания падающим грузом высоковязких сталей для магистральных газопроводных труб.

2. На примере стали X80 толщиной 27,7 мм показано влияние величины запасенной энергии копра на упрочнение металла образца при ударе молота в процессе испытания падающим грузом. С ростом запасенной энергии упрочнение растет.

3. Уточнены границы применения рекомендаций стандартов API5L3 и EN10274 по выбору величины запасенной энергии копра при испытании падающим грузом высоковязких трубных сталей. Рекомендации применимы только для сталей толщиной менее 25 мм.

4. Даны рекомендации по выбору величины энергии копра при ИПП высоковязких трубных сталей толщиной 25 мм и более. Для определения оптимального значения запасенной энергии необходимо проведение предварительных испытаний

стали данного состава, категории прочности и значениям количества вязкой составляющей и толщины с целью установления величины поглощенной энергии ИПГ. запасенной энергии, отвечающей максимальным

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Halsen K.O. Drop Weight Tear Testing of High Toughness Pipeline Material / K.O. Halsen, D.N. Veritas // Proc. of IPC 2004 Int. – Pipeline Conference (October 4–8, 2004). – Calgary, Alberta, Canada, 2004. – Pp. 87–96.
2. Hwang B. Analysis of Inverse Fracture Occurring in Hammer-Impacted Region During Drop-Weight Tear Test of a High-Toughness Linepipe Steel / B. Hwang, S. Lee, Y.M. Kim, N.I. Kim // Proceedings of the thirteenth Int. – Offshore and Polar Engineering Conference (May 25–30, 2003). – Honolulu, Hawaii, USA, 2003.
3. Wilkowski G. Evaluation of Fracture Speed on Ductile Fracture Resistance / G. Wilkowski, D.J. Shim, F.W. Brust, D. Rudland, D. Duan // Pipeline Technology Conference (October 12-14, 2009). – Ostende, Belgium, 2009.
4. Junker G. Einflüsse von Prefparametern auf die Ergebnisse von BDWT-Versuchen / G. Junker // Mannesmann, 8. – Grobron Symposium in Dyusseldorf (10.02.1985–17.02.1985).
5. API 5L3–96 (2003). Трубы магистральные. Рекомендованный метод испытания на ударный разрыв падающим грузом труб для магистральных трубопроводов.
6. BS EN 10274:1999. Материалы с металлическими свойствами. Испытания падающим грузом.
7. ГОСТ 30456–97.Metalloprodukcija. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб.
8. Erdelen-Peppler M. Significance of Dwt Testing for Linepipe Safety / M. Erdelen-Peppler, R. Gehrmann, G. Junker, A. Liessem // 6th International Pipeline Conference IPC 2006 (September). – Calgary, Canada, 2006.
9. Wilkowski G. Fracture Propagation Toughness Measurements / G. Wilkowski // Paper K. – 6th Symposium on line Pipe research. – American Gas Association, Arlington. – VA Catalogue № L30175. – 1979.
10. Демифонти Дж. Оценка остановки распространения разрушения в стальных трубах Х100, полученных по технологии ТМКО, для газопроводов высокого давления / Дж. Демифонти, Дж. Маннуччи, М. Ди Бьяджо, А. Фонзо // Современные стали для газонефтепроводных труб. Проблемы и перспективы. – Москва, 2006. – С. 22–31.
11. Higuchi R. New Concept and Test Method on Running Ductile Fracture Arrest for High Pressure Gas Pipeline / R. Higuchi, H. Makino, I. Takeuchi.
12. Пемов И. Ф. Соотношение работы разрушения и количества вязкой составляющей в изломе образцов при ИПГ толстолистового проката, полученного контролируемой прокаткой / И. Ф. Пемов, Ю. Д. Морозов и др. – Metallurg. – № 1. – 2012. – С. 63–68.

REFERENCES

1. Halsen K.O. and Veritas D.N. Drop Weight Tear Testing of High Toughness Pipeline Material. Proc. of IPC 2004. Int. Pipeline Conference, October 4–8, 2004, Calgary, Alberta, Canada, pp. 87–96.
2. Hwang B., Lee S., Kim Y.M. and Kim N.I. Analysis of Inverse Fracture Occurring in Hammer-Impacted Region During Drop-Weight Tear Test of a High-Toughness Linepipe Steel. Proceedings of the thirteenth Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, May 25–30, 2003.
3. Wilkowski G., Shim D.J., Brust F.W., Rudland D. and Duan D. Evaluation of Fracture Speed on Ductile Fracture Resistance, Pipeline Technology Conference, Ostende, Belgium, October 12–14, 2009.
4. Junker G. Einflüsse von Prefparametern auf die Ergebnisse von BDWT-Versuchen, Mannesmann, 8. Grobron Symposium in Dyusseldorf, 10.02.1985–17.02.1985.
5. API 5L3–96 (2003). *Truby magistral'nye. Rekomendovannyj metod ispytaniya na udarnyj razryv padayuschim gruzom trub dlya magistral'nyh truboprovodov* [Recommended Practice for Conduction Drop Weight Tear Test on Line Pipe]. (in Russian)
6. BS EN 10274:1999. *Materialy s metallicheskimy svojstvami. Ispytaniya padayuschim gruzom* [Metallic Materials Drop Weight Tear Tests]. (in Russian)
7. ГОСТ 30456-97. *Metalloprodukcija. Prokat listovoj i truby stal'nye. Metody ispytaniya na udarnyj izgib* [Steel products. Rolling plates and pipes steel. Test methods on a shock bend]. (in Russian)
8. Erdelen-Peppler M., Gehrmann R., Junker G. and Liessem A. Significance of Dwt Testing for Linepipe Safety. 6th International Pipeline Conference IPC 2006. Calgary, Canada, September 2006.
9. Wilkowski G. Fracture Propagation Toughness Measurements. Paper K, 6th Symposium on line Pipe research, American Gas Association, Arlington, VA Catalogue No L30175, 1979.
10. Demofonti J., Mannuchchi J., Di Biaggio M. and Fonzo A. *Ocenka ostanovki rasprostraneniya razrusheniya v stal'nyh trubah H100, poluchennyh po tehnologii ТМКО, dlya gazoprovodov vysokogo davleniya* [Fracture arrest evaluation of X100 TMCP Steel Pipes for high pressure Gas transportation Pipelines]. *Sovremennye stali dlya gazonefteprovodnyh trub. Problemy i perspektivy* [Modern Steels for Gas and Oil Transmission Pipelines. Problems and perspectives]. Moscow, 2006, pp. 22–31. (in Russian)
11. Higuchi R., Makino H. and Takeuchi I. New Concept and Test Method on Running Ductile Fracture Arrest for High Pressure Gas Pipeline.
12. Pемов I.F., Morozov Yu.D. and etc. *Sootnoshenie raboty razrusheniya i kolichestva vyazkoj sostavlyayushej v izlome obrazcov pri IPG tolstoлистового проката, poluchennogo kontroliruemoj prokatkoj* [A ratio of operation of corrupting and quantity of a viscous component in a fracture of samples in case of FWT of the hot-rolled plate received by controlled rolling]. *Metallurg* [Metallurgist]. No. 1, 2012, pp. 63–68. (in Russian)

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, доц. В. Н. Волчуком (Украина), д-ром техн. наук, проф. Д. В. Лаухиньым (Украина).

Поступила в редколлегию 21.08.2017 Принята в печать 03.09.2017