

for compositions and heat treatment technologies of multi-component alloy steels. Thesis of doct. tech. sci. diss.]. Mariupol, 2007. 40 p.

5. Martin J. Micromechanisms in particle hardened alloys. Cambridge, Cambridge Univ. Press Publ., 1980. 167 p.

Рецензент: Л.С. Малінов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 28.10.2016

УДК 669.14.018.28:621.642.2

© Белосточный А.В.¹, Солошенко П.В.²,
Григорьева М.А.³, Савенков С.В.⁴

ДЕГРАДАЦИЯ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ, ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Исследованы механические свойства и структура металла цельнометаллических газовых баллонов из среднеуглеродистой стали после различной продолжительности их эксплуатации. Показано, что продолжительность эксплуатации не оказывает существенного влияния на уровень прочностных характеристик металла сосудов, но приводит к некоторому снижению пластических свойств и значительному снижению ударной вязкости. Установлено, что проявление деградации ударной вязкости наблюдается после эксплуатации сосудов в течение 25-30 лет. Выявлено различие характера температурной зависимости ударной вязкости металла баллонов от продолжительности их эксплуатации при испытании образцов типов Менаже и Шарпи.

Ключевые слова: баллон, продолжительность эксплуатации, деградация свойств, ударная вязкость металла.

Білосточний А.В., Солошенко П.В., Григор'єва М.О., Савенков С.В. Деградація властивостей металу суцільнометалевих посудин, що працюють під тиском, при тривалій експлуатації. Досліджені механічні властивості та структура металу суцільнометалевих газових балонів із середньовуглецевої сталі після експлуатації різної тривалості. Показано, що тривалість експлуатації не надає суттєвого впливу на рівень міцності металу посудин, але призводить до деякого зниження пластичних властивостей і значному зниженню ударної в'язкості. Встановлено, що прояв деградації ударної в'язкості спостерігається після тривалості експлуатації посудин на протязі 25-30 років. Виявлена відмінність характеру температурної залежності ударної в'язкості металу балонів від тривалості їх експлуатації при випробуванні зразків типу Менаже та Шарпі.

Ключові слова: балон, тривалість експлуатації, деградація властивостей, ударна в'язкість металу.

A.V. Belostochnyy, P.V. Soloshenko, M.O. Grigorieva, S.V. Savenkov. The degradation of metal vessels properties working under pressure during a long term use. Mechanical properties and metal structure of all-metal gas tanks made of medium-carbon steel after

¹ техн. експерт, вед. інженер, ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», г. Мариуполь, andrey.belostochnyy@ilyichsteel.com

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

⁴ ст. научн. сотр., ГП «Научно-исследовательский трубный институт», г. Днепр

different periods of service have been studied. It has been observed that the duration of the service does not significantly influence on the strength of the metal tanks, but it leads to some reduction of plasticity and toughness decrease. It has been observed that toughness degradation appears after 25-30 years of tanks exploitation. At testing of the Menazhe and Sharp specimen it was also found out that temperature dependence of metal tanks toughness varies with the service life. It has been noted that the metal microstructure does not change under continuous operation. Therefore the decrease in properties after long-term use of the cylinders was caused by the metal substructure. Exploration of the mechanism and kinetics of the substructure changes requires special studies. On the strength of these data the need to improve the existing methods of periodic inspection (as a function of service time) of all-metal steel cylinders, as well as setting limits of the lifespan of these vessels has been shown.

Keywords: *balloon, lifespan, degradation, properties, metal toughness.*

Постановка проблеми. В нормативно-технічних документах, регулюючих роботу і експлуатацію різних металоконструкцій, в якості базових приймаються стандартні характеристики механічних властивостей матеріалів, використовуваних для їх виготовлення. При цьому передбачається, що ці властивості матеріалів є незмінними і забезпечують надійність і довговічність металоконструкцій впродовж всього розрахункового часу їх експлуатації.

Однак, як показала практика, для ряду металоконструкцій, що працюють в умовах значительних напружень, збільшенням часу експлуатації має місце зниження ресурсу їх придатності, що проявляється в збільшенні числа відмов (аварійних руйнувань) через погіршення властивостей матеріалів, з яких вони були виготовлені.

Ухудшення властивостей матеріалів при тривалій експлуатації металоконструкцій різного виду є експериментально встановленим фактом і присуще не тільки сталю [1], але і іншим сплавам [2]. В літературі це явище відомо під терміном «деградація властивостей».

Деградація є наслідком протікання в металі під впливом зовнішніх факторів ряду процесів, різних за своєю природою, механізмом, кінетикою розвитку. В залежності від видів металоконструкцій, умов їх експлуатації вона може проявлятися в формі змін характеристик механічних властивостей, структурного стану, утворення і розвитку дефектів на поверхні і в об'ємі металу, корозійних пошкоджень. Виявлення розвитку процесів деградації, вивчення їх природи для конкретних металоконструкцій, в тому числі і судів, що працюють під тиском, є важливим, так як дозволить більш надійно оцінювати поточне технічне стан цих об'єктів з урахування впливу фактора часу їх експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В наші часи відомі обширні експериментальні дослідження деградації властивостей металу після тривалої експлуатації, виконані для газопроводів, виготовлених з малоуглеродистих низколегованих сталей різних марок [3-8], а також для будівельної арматури залізобетонних конструкцій [9]. Для інших металоконструкцій, в частині циліндричних баллонів середнього об'єму, що входять до складу великої групи судів, що працюють під тиском, які виготовляються з середньоуглеродистого сталю, дані про вплив тривалості експлуатації на властивості металу відсутні.

Умови експлуатації баллонів і газопроводів в багатьох відношеннях схожі. Як і ті, і інші мають циліндричну форму, що обумовлює в процесі експлуатації аналогічний характер їх напруженого стану. Однак характерною особливістю експлуатації баллонів, крім різниці матеріалу, є циклічність їх навантаження внутрішнім тиском з великим діапазоном, практично від нуля до 14,7-19,6 МПа. Кількість таких циклів залежить від тривалості їх служби.

Розрахунковий термін служби для судів заданого типу нормативними документами не встановлено. Виконані дослідження показали, що в наші часи в експлуатації знаходяться балони з терміном служби 60 років і більше.

Існуючі методики періодичної оцінки технічного стану баллонів не враховують впливу часового фактора на властивості металу. В зв'язі з цим інформація об

изменении свойств металла указанных сосудов после продолжительной их работы является весьма важной, так как только на основе нее возможно установление научно обоснованных предельных сроков эксплуатации и совершенствование методик периодической оценки их технического состояния.

Формулировка целей статьи. Целью настоящей работы являлось изучение влияния продолжительности эксплуатации на механические свойства и структуру металла цельнометаллических баллонов. Для исследования были отобраны баллоны вместимостью 40 литров, предназначенные для эксплуатации с рабочим давлением 14,7 МПа. Продолжительность эксплуатации этих сосудов составляла от нуля (новые изготовленные) до 61 года. По данным контрольного химического анализа исследуемые баллоны были изготовлены из среднеуглеродистой стали марки Дс (С 0,43-0,51%, Mn 0,7-1,0%) или из стали 45 с химическим составом в тех же пределах.

Отбор проб и определение механических свойств металла опытных баллонов проводили по стандартным методикам, используемым при сдаточных испытаниях партий сосудов при их серийном производстве. Так как для оценки вязких свойств металла сосудов отечественного изготовления [10] регламентированы испытания на образцах Менаже, дополнительно определяли значения ударной вязкости металла на образцах Шарпи, используемых при приемочных испытаниях аналогичных сосудов за рубежом. Исследование микроструктуры металла баллонов с разной продолжительностью эксплуатации выполняли металлографическим методом.

Согласно [10] конструктивная прочность баллонов и их надежность обеспечиваются при уровне характеристик механических свойств стали $\sigma_r \geq 373 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_b \geq 638 \text{ Н/мм}^2$, $\delta_5 \geq 15\%$, $KCU^{+20} \geq 29,4 \text{ Дж/см}^2$. Оценка соответствия этих характеристик проводится по результатам контрольных испытаний металла отдельных сосудов, отобранных из партии изготовленных баллонов. Как показали ранее выполненные исследования, значения этих характеристик для баллонов в пределах одной партии могут несколько отличаться от контрольных.

В связи с тем, что по указанным выше причинам установить исходные значения характеристик механических свойств металла каждого из исследованных сосудов не представлялось возможным, в качестве базового уровня использовали статистические данные приемосдаточных испытаний нормируемых характеристик механических свойств металла более 1300 партий баллонов, изготовленных за период 2000-2010 гг.

Изложение основного материала. Результаты исследования показали (таблица), что величины прочностных характеристик механических свойств металла баллонов при продолжительности эксплуатации до 61 года не изменяются, соответствуют требованиям [10] и находятся в пределах колебания значений, статистически установленных по данным приемосдаточных испытаний партий сосудов.

Таблица

Механические свойства металла баллонов с различной продолжительностью эксплуатации

| Продолжительность эксплуатации, годы | Предел текучести, Н/мм ² | Временное сопротивление, Н/мм ² | Относительное удлинение, % | Ударная вязкость, КСУ ⁺²⁰ Дж/см ² |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------|---|
| 2 | 421,4 | 671,3 | 26,0 | 82,6 |
| 2 | 423,3 | 700,7 | 24,5 | 71,5 |
| 8 | 396,0 | 766,7 | 20,5 | 51,5 |
| 16 | 407,0 | 734,0 | 22,5 | 71,1 |
| 16 | 416,0 | 687,0 | 25,0 | 90,7 |
| 21 | 404,7 | 743,3 | 20,5 | 56,3 |
| 29 | 437,3 | 794,7 | 18,5 | 41,6 |
| 29 | 376,0 | 688,0 | 21,5 | 37,0 |
| 36 | 382,2 | 669,0 | 18,0 | 41,7 |
| 61 | 386,0 | 683,0 | 18,0 | 49,0 |
| 0 (базовый уровень) | 373-522 | 638-855 | 15-27 | 29,4-110 |

Относительное удлинение и величина ударной вязкости KCU^{+20} металла при длительности эксплуатации примерно до 25 лет также остаются практически неизменными. С увеличением времени эксплуатации баллонов свыше 25-30 лет эти характеристики свойств металла проявляют явно выраженную тенденцию к снижению.

Следует отметить, что отсутствие значимых изменений прочностных свойств после весьма продолжительной эксплуатации (30 лет и более) было установлено [4, 6, 7] и для металла газопроводов, изготовленных из малоуглеродистых низколегированных марок сталей.

Исследование ударной вязкости, выполненное на образцах Менаже и Шарпи (KCU и KCV), позволило установить характерные особенности влияния продолжительности эксплуатации на склонность металла баллонов к хрупкому разрушению. Результаты серийных испытаний на ударную вязкость этих образцов в интервале температур от +20 до -60°C представлены на рисунке.

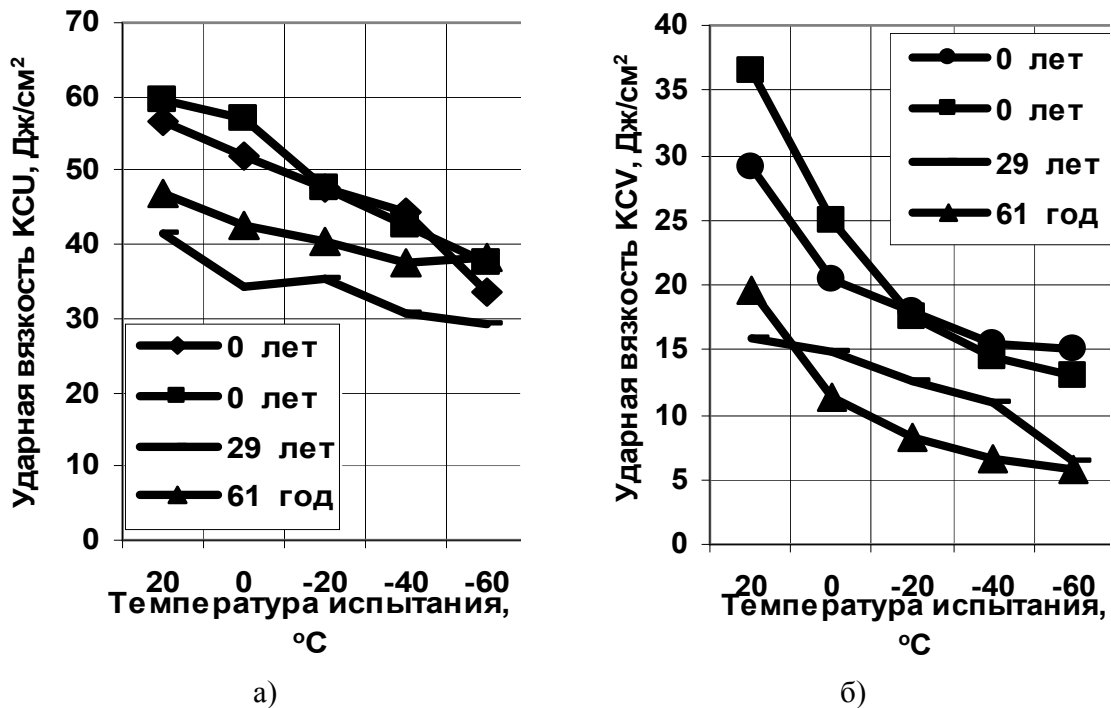


Рисунок – Температурная зависимость ударной вязкости металла KCU (а) и KCV (б) баллонов с различной продолжительностью эксплуатации

Как видно, металл баллонов с длительными сроками эксплуатации имеет более низкий уровень ударной вязкости KCU и KCV. Температурные зависимости ударной вязкости металла баллонов с различным сроком службы, определенной на образцах Менаже и Шарпи, существенно различаются. С понижением температуры испытания средние значения KCU (рис. а) и KCV (рис. б) металла исследованных баллонов снижаются.

Следует отметить, что разница значений ударной вязкости KCU для баллонов с продолжительностью эксплуатации 0 лет (новые баллоны) и 61 год в интервале температур испытания от 20°C до -40°C непрерывно уменьшается. При температурах испытаний -40°C и -60°C различие значений этой характеристики для металла баллонов с разным сроком службы практически не наблюдается. Для ударной вязкости KCV разница уровней этой характеристики механических свойств металла баллонов с той же продолжительностью эксплуатации во всем исследованном интервале температур остается практически неизменной и составляет 10-15 Дж/см². Полученные результаты показывают, что ударная вязкость, определенная на образцах Шарпи, более полно отражает влияние времени эксплуатации баллонов на склонность их металла к хрупкому разрушению.

Кривые зависимости ударной вязкости металла от температуры испытания для баллонов, находившихся в эксплуатации 29 лет, для обоих типов образцов имеют признаки (значение

ударной вязкости, темп ее снижения в разных интервалах температур), характерные как для металла новых сосудов, так и для сосудов с большой продолжительностью эксплуатации. Наблюдаемый промежуточный характер зависимости ударной вязкости металла от температуры испытания для баллона со сроком службы 29 лет позволяет предположить, что начальные стадии процессов деградации свойств металла баллонов, изготовленных из среднеуглеродистой стали, имеет место уже после 25-30 лет их эксплуатации.

Металлографические исследования показали, что длительная эксплуатация баллонов не приводит к видимым изменениям в микроструктуре металла, выявляемыми оптическим методом. Во всех случаях структура металла была перлитно-ферритной, характерной для нормализованного состояния среднеуглеродистой стали. Следовательно, наблюдаемое снижение свойств металла цельнометаллических сосудов, работающих под давлением, является следствием изменения его субструктуры при продолжительной эксплуатации. Для выяснения механизма и кинетики таких изменений субструктуры требуется проведение специальных исследований.

Выводы

Продолжительность эксплуатации цельнометаллических баллонов из среднеуглеродистой стали практически не оказывает влияния на уровень прочностных характеристик механических свойств металла, но приводит к некоторому уменьшению пластичности и значительному снижению его ударной вязкости. Проявление процессов деградации ударной вязкости имеет место после эксплуатации баллонов в течение 25-30 лет. Температурные зависимости КСЧ и КСВ металла баллонов с различной продолжительностью эксплуатации имеют разный характер. Продолжительность эксплуатации сосудов не приводит к изменению микроструктуры металла, определяемой оптическим методом. Деградация пластических и вязких свойств при продолжительной эксплуатации баллонов является следствием изменения субструктуры их металла. Для установления механизма и кинетики развития процессов, приводящих к снижению ударной вязкости металла баллонов, требуется проведение дополнительных исследований. Явление деградации свойств металла цельнометаллических баллонов, работающих под давлением, ставит вопрос о необходимости усовершенствования существующей методики периодического освидетельствования этих сосудов с учетом временного фактора эксплуатации и установления предельного срока их службы.

Список использованных источников:

1. Одесский П.Д. О деградации свойств сталей для металлических конструкций / П.Д. Одесский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – № 10, Т. 69. – С. 41-49.
2. Исследование деградации механических характеристик конструкционного сплава Д16 в результате воздействия эксплуатационной нагрузки / В.М. Байков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – № 11, Т. 69. – С. 50-54.
3. Зависимость изменения механических свойств металла трубопроводов от срока их эксплуатации / Ф.Д. Нуриахметов [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». – 2002. – № 4. – С. 41-49.
4. Филиппов Г.А. Деградация свойств металла при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов / Г.А. Филиппов, О.В. Ливанова, В.Ф. Дмитриев // Сталь. – 2003. – № 2. – С. 84-87.
5. Статистическая оценка деградации свойств материала нефтепровода / Л.А. Сосновский [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2003. – № 11, Т. 69. – С. 40-49.
6. Об оценке влияния длительной эксплуатации на механические свойства и структуру металла магистральных нефтепроводов / Н.П. Лякишев [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 1, Т. 73. – С. 75-82.
7. Материаловедческие условия сохранения несущей способности металла магистральных газопроводов при их длительной эксплуатации / М.М. Кантор [и др.] // Металлы. – 2009. – № 4. – С.46-56.
8. Проблема остаточного ресурса прочности и трещиностойкости трубопроводных систем при длительной эксплуатации / Ю.И. Пашков [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». – 2006. – № 4. – С. 54-64.

9. Микрюков В.Р. Физическая природа деградации свойств, фазового состава и дефектной субструктуры арматурной стали при длительной эксплуатации: Монография / В.Р. Микрюков, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2007. – 170 с.
10. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P_p \leq 19,6$ МПа (200 кгс/см²). Технические условия : ГОСТ 949-73. – Введен 1973-12-19. – М. : ИПК Издательство стандартов, 1973. – 13 с. – (Межгосударственный стандарт).

References:

1. Odesskii P.D. O degradatsii svoistv stali dlia metallicheskikh konstruksii [On the degradation properties of steels for metal forms]. *Zavodskaiia laboratorii. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnosis*, 2003, no. 10, vol. 69, pp. 41-49. (Rus.)
2. Baikov V.M., Butushin S.V., Gorodetskii V.N. Issledovanie degradatsii mekhanicheskikh kharakteristik konstruksionnogo splava D16 v rezul'tate vozdeistviia ekspluatatsionnoi nagruzki [Research on degradation of mechanical characteristics of the alloy D16 exposed to pressure]. *Zavodskaiia laboratorii. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnosis*, 2003, no. 11, vol. 69, pp. 50-54. (Rus.)
3. Nuriakhmetov F.D., Stepanenko A.I., Smirnov N.A. Zavisimost' izmeneniia mekhanicheskikh svoistv metalla truboprovodov ot sroka ikh ekspluatatsii [The dependence of the changes in the mechanical properties of the metal pipes during their lifetime]. *Biulleten' «Chernaia metallurgiiia» – Bulletin «Iron and steel»*, 2002, no. 4, pp. 41-49. (Rus.)
4. Filippov G.A., Livanova O.V., Dmitriev V.F. Degradatsiia svoistv metalla pri dlitel'noi ekspluatatsii magistral'nykh truboprovodov [The degradation of metal properties during prolonged operation of pipelines]. *Stal' – Steel*, 2003, no. 2, pp. 84-87. (Rus.)
5. Sosnovskii L.A., Makhutov N.A., Bordovskii A.M. Statisticheskaiia otsenka degradatsii svoistv materiala nefteprovoda [Statistical evaluation of the degradation of the material properties of oil]. *Zavodskaiia laboratorii. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnosis*, 2003, no. 11, vol. 69, pp. 40-49. (Rus.)
6. Liakishev N.P., Kantor M.M., Belkin A.A. Ob otsenke vliianiia dlitel'noi ekspluatatsii na mekhanicheskie svoistva i strukturu metalla magistral'nykh nefteprovodov [An estimate of the effect of longterm operation on the mechanical properties and metal structure of the main oil pipelines]. *Zavodskaiia laboratorii. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnosis*, 2007, no. 1, vol. 73, pp. 75-82. (Rus.)
7. Kantor M.M., Voronin V.N., Bozhenov V.A. Materialovedcheskie usloviia sokhraneniia nesushchei sposobnosti metalla magistral'nykh gazoprovodov pri ikh dlitel'noi ekspluatatsii [Conditions for the conservation of the main gas pipelines carrying metal capacity during their longterm operation]. *Metally – Metals*, 2009, no. 4, pp. 46-56. (Rus.)
8. Pashkov Y.I., Danchakov G.A., Stepanenko A.I. Problema ostatochnogo resursa prochnosti i treshchinostoikosti truboprovodnykh sistem pri dlitel'noi ekspluatatsii [The problem of a residual resource of strength and fracture toughness of pipeline systems in continuous operation]. *Biulleten' «Chernaia metallurgiiia» – Bulletin «Iron and steel»*, 2006, no. 4, pp. 54-64. (Rus.)
9. Mikryukov V.R. *Fizicheskaiia priroda degradatsii svoistv, fazovogo sostava i defektnoi substrukturny armaturnoi stali pri dlitel'noi ekspluatatsii: monografiia* [The physical nature of the degradation properties, phase composition and defect substructure of reinforcing steel in their long term use: monograph]. Novokuznetsk, SibGIU Publ., 2007. 170 p. (Rus.)
10. *GOST 949-73. Ballony stal'nye malogo i srednego ob'ema dlia gazov na $P_p \leq 19,6$ МПа (200 kgs/sm²). Tekhnicheskie usloviia* [State standart 949-73. Steel cylinders of small and medium volume for gases $P_p \leq 19.6$ МПа (200 kgf / cm²). Specifications]. Moscow, Publisher IPC standards, 1973. 13 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 10.10.2016