

7. Shiryaev A.V. *Razvitie kontaktno-ustalostnogo vykrashivaniia pri tsiklicheskom kontakte tel. Anotsatsii dopovidei 11 Region. nauk.-prakt. konf.* [Development of the pin-tireless painting at the cyclic contact of bodies. Abstracts of 11th. Region. Sci.-Pract. Conf.]. Mariupol, 2004, vol. 2, p. 17. (Rus.)
8. Morozov B.A. *Kontaktno-ustalostnaia prochnost' opornykh valkov* [Contact fatigue strength of rolls]. *Napriazheniia, deformatsii i raschety na prochnost' metallurgicheskikh mashin: sb. nauch. trud. VNIIMETMASH – Stress, strain and strength calculations of metallurgical machines: collection of VNIIMETMASH scientific works*, 1988, pp. 30-42. (Rus.)
9. Shiryaev A.V., Golovachjova I.V. *Issledovanie kasatel'noi sily pri kachenii v usloviakh uprugoplasticheskogo i plasticheskogo kontakta* [Research of tangent force at wobbling in the conditions of resilient – plastic and plastic contact]. *Zashchita metallurgicheskikh mashin ot polomok – Protection of metallurgical machinery from damage*, 2010, no. 14, pp. 32-35. (Rus.)
10. Drozd M.S. *Opreделение mehanicheskikh svoystv metalla bez razrusheniya* [Determination of mechanical properties of metal non-destructive]. Moscow, Metallurgiya Publ. 72 p. (Rus.)
11. Kudryavtsev I.M. *Vliianie krivizny poverkhnostei na glubinu plasticheskoi deformatsii pri uprochnenii detalei poverkhnostnym naklepom* [Influence of curvature surfaces to a depth of plastic deformation when hardening details surface of work hardening]. *Voprosy prochnosti i dolgovechnosti mashinostroitel'nykh materialov i detalei: Sb. nauch. tr. TsNIITMASH – Questions of strength and durability of engineering materials and components: collection of TSNIITMASH scientific works*, 1966, no. 61, pp. 111-116. (Rus.)

Рецензент: В.М. Кравченко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 03.10.2016

УДК 669.184-412:539.4.011

© Лоза А.В.¹, Чигарев В.В.², Шишкин В.В.³

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СТАЛЬНЫХ ЛИТО-СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрены приемы качественного изготовления и ремонта стальных лито-сварных конструкций. Показаны преимущества комбинированных изделий и их недостатки, обусловленные структурой литого металла. Рассмотрено влияние дефектов сварного соединения на прочность конструкции. Даны рекомендации, обеспечивающие высокое качество сварного соединения и более длительный срок эксплуатации конструкций.

Ключевые слова: лито-сварная конструкция, углеродистые стали, сварное соединение, дефекты структуры, прочность, качество, долговечность.

Лоза А.В., Чигарев В.В., Шишкин В.В. *Підвищення якості сталевих лито-зварних конструкцій. Розглянуті прийоми якісного виготовлення і ремонту сталевих лито-зварних конструкцій. Показані переваги комбінованих виробів і їх недоліки, обумовлені структурою литого металу. Розглянутий вплив дефектів зварного з'єднання на міцність конструкції. Дані рекомендації, що забезпечують високу якість зварного з'єднання і більш тривалий термін експлуатації конструкцій.*

Ключові слова: лито-зварна конструкція, вуглецеві сталі, зварне з'єднання, дефекти структури, міцність, якість, довговічність.

¹ ст. преп., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, loza_a_v@pstu.edu

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, chigarew07@rambler.ru

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

A.V. Loza, V.V. Chigarev, V.V. Shishkin. Quality improvement of steel cast-welded constructions. Among the various types of metallurgical equipment there are structures which are welded compounds of a cast base and additional elements produced by casting or any other means. Such structures are called cast-welded constructions. Besides new working properties such constructions appear to be more efficient and provide better durability as compared to the similar structures produced by other industrial means. Meanwhile the advantages of the technology are not used in full. One reason is low quality of the compound products caused by lack of proper preparation of the elements to be welded and poor quality of the welds themselves. In the article the methods of quality production and the maintenance of steel cast-welded constructions have been considered. A ladle of a blast-furnace slag car is used as the subject of investigation and further testing of the mentioned above technologies. The ladle is a cast product. Under operating conditions, the ladle undergoes mechanical and thermal load, which results in deformation of its sides that deflect inside. To prevent the deflection stiffening ribs are welded onto the outer surface of the ladle. However, there may be casting defects in the base metal that could reduce the durability of the welds. It has been proved that welds on the unprepared cast base of the steel product cannot guarantee the combination's durability and reliability. To prevent the influence of the casting defects it has been recommended to cover the base metal with one more metal layer before welding the elements on. Two-layer surfacing provides best result as the first layer serves for the weld penetration of the casting defects since this layer has a significant share of base metal therefore it is less malleable; the second layer is necessary for making the layer viscous enough. The viscous layer ensures the absence of sharp transition from the deposited metal to the base metal and increases the crack resistance of the weld. In case the recommendations are followed, the high quality of steel cast-welded constructions and their longer service life can be ensured.

Keywords: cast-welded construction, carbon steels, welded combination, structure defects, durability, quality, longer service life.

Постановка проблеми. В металургії і других отраслях промисловості часто використовуються комбіновані конструкції, представляючі собою сварне з'єднання литої основи і додаткових елементів, виготовлених литтям або другим способом. Конструкції такого роду називають лито-сварними. Необхідність в їх створенні виникає, якщо вказані елементи важко отримати литтям в моноблоку або їх якість в литому стані є негарантованим. Комбіновані конструкції дозволяють отримувати вироби з новими експлуатаційними властивостями і, в ряді випадків, є більш економічними і більш довговічними порівняно з аналогами, виготовленими іншими промисловими способами. Незважаючи на раціональність і перспективність таких виробів, їх переваги використовуються поки не в повній мірі. Однією з причин цього є низька якість комбінованих виробів, пов'язана з відсутністю якісної підготовки зварюваних деталей і незадовільною якістю самого сварного з'єднання. Тому аналіз і уточнення заходів по раціональним способам виготовлення і ремонту комбінованих лито-сварних конструкцій має важливе практичне значення. Улучшення якості цих виробів дозволить суттєво підвищити їх надійність і термін експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В літературі питанням підвищення якості лито-сварних виробів приділено дуже мало уваги [1, 2]. Обзор статей і патентів показує, що результати досліджень по цьому напрямку не опубліковані. В той же час дана проблема є актуальною і потребує рішення.

Цель статьи – аналіз причин виходу з ладу лито-сварних конструкцій з вуглеродистих сталей і розробка рекомендацій до технології їх виготовлення і ремонту, що забезпечують підвищення надійності і збільшення терміну експлуатації виробів.

Изложение основного материала. Однією з задач проектування конструкцій, що працюють в умовах механічних і температурних навантажень, є забезпечення їх конструктивної міцності. Це в повній мірі стосується і лито-сварних конструкцій. Для забезпечення цього виконують розрахунки міцності і моделювання поведінки об'єкта при дей-

ствии на него заданных сил. Применение методов каркасного проектирования позволяет рассмотреть и виртуально испытать 3-хмерные модельные объекты при любых сочетаниях нагрузок [3]. Это дает возможность установить основные и второстепенные факторы, оказывающие влияние на работу рассматриваемого узла оборудования, а также анализировать их действие на изделие при различных вариантах конструктивного исполнения. Эти же расчетные модели могут быть использованы для анализа работоспособности уже изготовленных и работающих на производстве узлов оборудования при возникновении в них повреждений, износа, в момент начала аварийных ситуаций. При этом в теоретическую модель вносятся определенные поправки, которые отражают особенности работы действующего промышленного оборудования. Такие уточнения к теоретически построенным моделям имеют принципиально важное значение, т.к. позволяют перейти от идеальных условий к реальным, установить основные причины разрушения и наметить пути предупреждения этого.

Современное металлургическое производство характеризуется большим парком металлоемкого оборудования, в связи с чем расходы на его содержание являются весьма значительными. При работе предприятия в непрерывном режиме от каждой единицы оборудования требуется максимальная надежность и долговечность. Рассмотрение проблемы надежности и ремонтпригодности можно проводить для различных узлов оборудования. Решение такой проблемы наиболее эффективно для металлоёмких изделий, на примере которых напрямую видна целесообразность усовершенствования технологии и экономии средств предприятия. Одним из примеров работы комбинированной лито-сварной конструкции является чаша шлаковоза, изготавливаемая из углеродистых сталей, как и десятки других позиций основного и вспомогательного металлургического оборудования. Шлаковоз обладает значительной металлоемкостью (масса чаши более 20 тонн) и значительной стоимостью. Для таких изделий особенно наглядна рациональность применения незначительной технической доработки и получения экономического эффекта за счет применения сварочных технологий. Чаша шлаковоза имеет корпус из углеродистой стали (30Л, 35Л) толщиной 90...120 мм, который служит для приема и последующей транспортировки расплавленных продуктов металлургического производства – жидкого шлака. Температура шлака в момент заливки находится в пределах 1500...1600°C. При эксплуатации чаша нагревается до различных температур: до 900°C на внутренней поверхности и от 300 до 450 °C на наружной. В области опорного кольца, в которое устанавливается чаша, в месте поворотных цапф происходит перегрев корпуса до 600-620°C на наружной поверхности, что снижает прочность корпуса и приводит к его деформации, т.к. механические характеристики при таких температурах значительно снижаются. Остаточные пластические деформации затрудняют работу шлаковозов, способствуют образованию трещин и раннему выходу чаши и привода шлаковоза из строя [4].

Для увеличения срока эксплуатации шлаковоза предложен [5] и опробован в промышленных условиях рациональный и экономичный способ сохранения первоначального профиля корпуса чаши за счет её упрочнения дополнительно прикрепленными к ней ребрами жесткости. Данный метод позволяет компенсировать недостатки литейной технологии и низкое качество более дешёвого литого металла преимуществами нескольких недорогих упрочняющих элементов, закрепленных при помощи сварки. Для чаши шлаковоза такие ребра должны быть выполнены из металла более высокого качества (катаных заготовок) толщиной не менее 30 мм и закреплены сваркой в зоне максимальных деформаций корпуса. Решение рациональное, удобное для реализации в любых производственных условиях, тем не менее, на практике при некорректном исполнении технологии возможно преждевременное разрушение элементов лито-сварной конструкции. Анализ работы металлургического оборудования показывает, что лито-сварные конструкции в основном выходят из строя по двум причинам: а) разрушение сварного соединения; б) разрушение упрочняющего элемента (одного или нескольких). В первую очередь разрушение может возникать в районе сварных швов комбинированной конструкции.

Применение любой сварочной технологии в случае сварки плавлением подразумевает возможность образования в металле дефектов даже при использовании качественного основного металла. В литом металле чаши, который является основой для лито-сварной конструкции, литейные дефекты могут присутствовать на любом участке корпуса. Такие дефекты могут значительно влиять на прочность и надежность сварной конструкции. Технология изготовления лито-сварных изделий должна учитывать это изначально, предусматривая соответствующие

операции подготовки и возможного устранения дефектов в металле-основе. Сквозные значительные дефекты не допускаются на стадии приемки ОТК литейного цеха, несквозные (рис. 1) должны быть исправлены сваркой на стадии подготовки к привариванию дополнительных упорочняющих элементов – ребер.



Рис. 1 – Литейные дефекты в сечении отливки из углеродистой стали 35Л

Проведенными экспериментами установлено, что выполнение сварных швов на неподготовленной литой основе любого стального изделия не может гарантировать прочность и надёжность соединения. Для предупреждения влияния литейных дефектов на работу конструкции предусмотрено выполнение специальной наплавки: промежуточного слоя на корпус чаши в месте установки ребер. Литой металл изначально обладает недостаточной пластичностью [6]. Поэтому операция наплавки должна быть выполнена с предварительным подогревом корпуса чаши до температуры 200°C. В комбинированных изделиях с разнородной структурой большое значение имеет качество металла в зоне сплавления. Изделия, которые подвергаются циклическим нагрузкам, должны иметь в переходной зоне металл с повышенной вязкостью. Для комбинированных изделий из углеродистых сталей хорошие результаты получены при наплавке электродами УОНИ 13/45, УОНИ 13/55. Наличие промежуточного слоя является обязательным. В связи с тем, что литые изделия характеризуются повышенным количеством неметаллических включений, наплавка обеспечивает отсутствие хрупких прослоек, что положительно влияет на прочность сварного соединения. Лучший результат (более высокие механические свойства металла шва) может быть получен при выполнении промежуточного слоя (подслоя) двухслойным. Первый слой предназначен для проплавления литейных дефектов. Поэтому для первого слоя следует выбирать режим наплавки с максимальной глубиной проплавления для заваривания приповерхностных металлургических дефектов, с применением соответствующих технических приемов (выбор угла наклона электрода, сварка на подъём, прогрев корня шва). При этом подповерхностные дефекты завариваются [7], но в проплавленном слое велика доля основного литого металла, который, как правило, имеет незначительный запас пластичности. Скорость охлаждения металла будет заметно снижена при выполнении второго слоя наплавки, в котором глубину проплавления следует уменьшать. Это дает возможность увеличить его вязкость. Такой промежуточный слой на основном литом металле конструкции позволяет сформировать сварной шов в тавровом соединении с требуемыми свойствами и минимальным количеством неметаллических включений. Вязкий слой наплавки обеспечивает отсутствие резкого перехода от наплавленного металла к основному, что повышает стойкость шва к образованию трещин [8] и надёжность лито-сварной конструкции. Ориентировочный химический состав наплавленного слоя, масс. %: $C \leq 0,11$; $Si 0,18-0,50$; $Mn 0,45-1,20$; $S \leq 0,030$; $P \leq 0,035$. Металл с таким химическим составом обеспечивает высокие механические свойства: $\sigma_b = 460-490$ МПа, $\sigma_T = 350-400$ МПа, $\delta = 20-22\%$.

Существенное влияние на прочность шва оказывают дефекты типа непровара, которые встречаются в изделиях и могут служить концентраторами напряжений в металле шва. Моделирование показывает, что при наличии таких дефектов напряжения в металле могут возрастать в несколько раз (рис. 2, а).

Кроме того, в структуре литого металла в зоне непровара наблюдается отсутствие вязкого промежуточного слоя, т. е. локально отсутствует проплавление металла (рис. 2, б), а в его приграничной зоне присутствует значительное количество неметаллических включений. Такой участок потенциально служит источником образования трещин при нагружении.

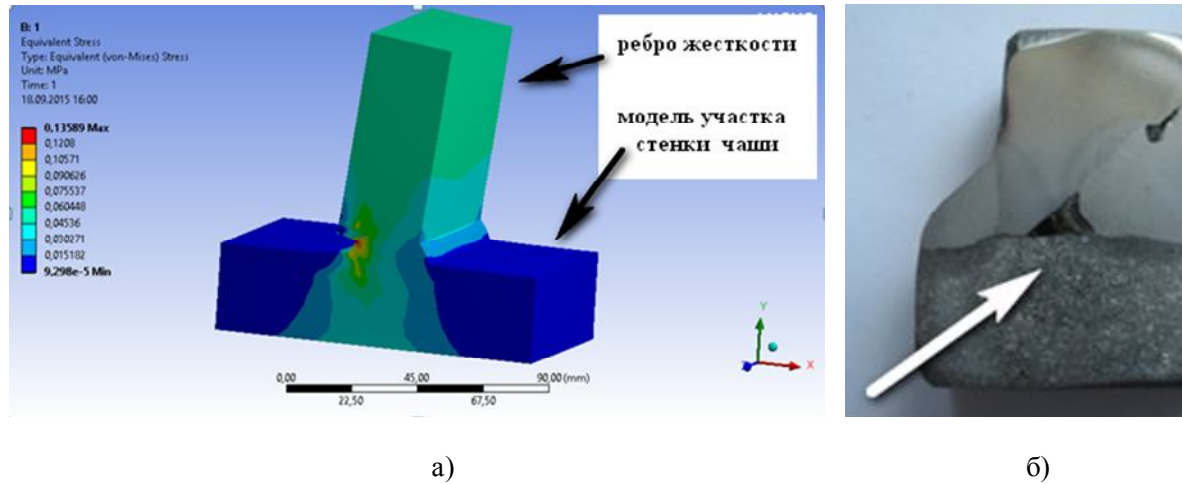


Рис. 2 – Исследование сварного соединения с дефектом: а – распределение напряжений в сечении соединения с дефектом шва, б – макроструктура сварного соединения

В связи с этим, обязательной операцией технологии сварки является проваривание корня шва таврового соединения электродом диаметром 3–4 мм. При условии выполнения указанных технических требований в сварном шве и околошовной зоне отсутствуют хрупкие прослойки, металл шва обладает высокими механическими свойствами, а разрушение лито-сварных соединений происходит по основному металлу (рис. 3).



Рис. 3 – Испытания лито-сварного соединения «Сталь 35Л-09Г2С»: а – схема отбора пробы, б – образец после испытания

Другой причиной преждевременного выхода из строя комбинированной конструкции может быть разрушение упрочняющего элемента. Изначально составные конструкции рассчитываются для стандартных условий, которые подразумевают среднестатистические свойства материала упрочняющего элемента (ребра). Значения механических свойств используются в модели, которая позволяет определить оптимальную форму упрочняющего элемента – ребра, его минимальную толщину, конструктивные особенности исполнения и габаритные размеры. Для чаш шлаковозов варианты исполнения упрочняющего элемента были просчитаны при сопоставимых нагрузках (рис. 4). Установлено, что на работоспособность упрочняющих элементов решающее влияние оказывает уровень напряжений в них в наиболее нагруженной области. Для ребра чаши шлаковоза таким участком является зона перехода от опорной поверхности ребра к ступенчатому выступу, на который передается горизонтальное усилие. Сравнительный

анализ расчетных напряжений в указанной области позволил рекомендовать выполнение скругления радиусом 15 мм. Такой вариант выбран как наиболее оптимальный и рекомендован для производства чаш. При обслуживании комбинированных конструкций расчетные размеры следует соблюдать также и в подвергаемых ремонту элементах.

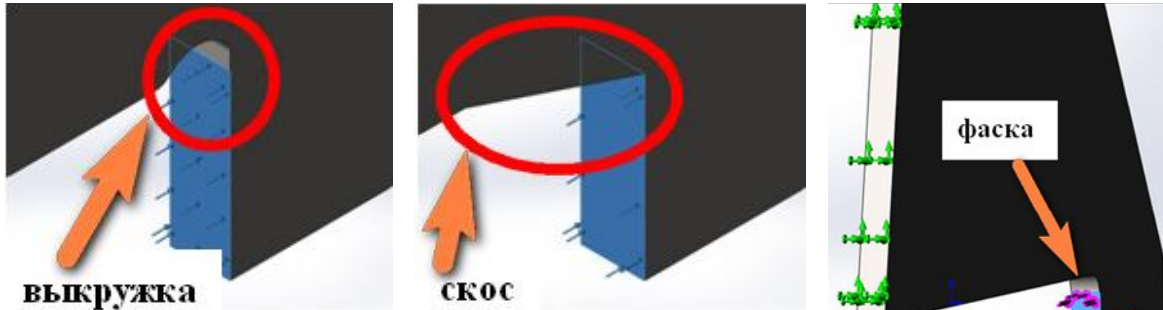


Рис. 4 – Сравнительные варианты конструкции ребра жесткости

В связи с этим технология создания лито-сварной конструкции подразумевает применение сертифицированного металла для изготовления ребер без отклонений по химическому составу и механическим свойствам от требований ГОСТ, а также соблюдение расчетных размеров упрочняющих элементов (ребер) с положительными допусками. Несоблюдение по любым причинам указанных условий приводит на практике к местным перегрузкам приваренных упрочняющих элементов (рис. 5).



Рис. 5 – Фрагмент лито-сварной конструкции чаши на стадии изготовления (а) и через 12 месяцев эксплуатации (б)

При этом упрочняющие элементы с отклонениями от расчетных размеров могут пластически деформироваться и не выполняют свою функцию в полной мере, что является результатом отклонения от технологии. Анализ состояния чаш лито-сварной конструкции и соблюдения правил эксплуатации показал, что работники обслуживающего персонала могут преднамеренно подрезать выступы ребер, например, для облегчения операции установки чаш в опорное кольцо вместо применения регулировочных

Выводы

1. Преждевременный выход из строя лито-сварных конструкций из углеродистых сталей связан, прежде всего, с наличием литейных дефектов, которые значительно снижают механические характеристики любого изделия. Для уменьшения влияния металлургических дефектов необходимо обеспечить выполнение промежуточного слоя с максимальной глубиной проплавления основного металла.

2. Так как швы с большой глубиной провара имеют несколько большую склонность к образованию горячих трещин, при выполнении промежуточного слоя в лито-сварных изделиях необходимо применять предварительный подогрев и замедленное охлаждение.

Список использованных источников:

1. Готальский Ю.Н. Сварка разнородных сталей / Ю.Н. Готальский – М. : Книга по требованию, 2012. – 180 с.
2. Максимов А.А. Наплавка деталей черпаковой цепи драги 250Л / А.А. Максимов, Г.А. Вольферц, С.А. Осак // Ползуновский альманах. – 2004. – № 4. – С. 165-166.
3. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
4. Емелин М.В. К вопросу оценки термонапряженного состояния и термopрочности чаш шлаковозов / М.В. Емелин, С.Р. Рахманов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 2. – С. 103-108.
5. Пат. 49434 Україна, МПК С 21 В 3/00. Чаша доменного шлаковоза / А.В. Лоза, В.В. Шишкін, С.М. Доля, М.В. Косолап, П.А. Гладкий, О.В. Осадчий, П.М. Кирильченко, Є.Л. Сенокосов, А.М. Асташин, Р.В. Тиненік. – № u200912329; заявл. 30.11.09; опубл. 26.04.10, Бюл. № 8. – 3 с.
6. Марочник сталей и сплавов / под ред. В.Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 639 с.
7. Лоза А.В. Особенности изготовления лито-сварных конструкций из углеродистых сталей / А.В. Лоза, В.В. Чигарев // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія : Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 17 (1189). – С. 8-13.
8. Nakashima K. Fatigue properties of welded joints using steel with high resistance to fatigue crack growth / K. Nakashima, H. Shimanuki, T. Nose // *Welding International*. – 2010. – V. 24, № 5. – P. 343-349.

References:

1. Gotal'skii Ju.N. *Svarka raznorodnykh staley* [Welding of heterogeneous steels]. Moscow, Kniga po trebovaniyu Publ., 2012. 180 p. (Rus.)
2. Maksimov A.A. Naplavka detalei cherpakovoi tsepi dragi 250L [Metal layer details bailer chain of dredge of 250L]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunovsky vestnik*, 2004, no. 4, pp. 165-166. (Rus.)
3. Aljamovskij A.A. *SolidWorks / COSMOSWorks. Inzhenernyi analiz metodom konechnykh elementov* [SolidWorks / COSMOSWorks. Engineering analysis by the method of eventual elements]. Moscow, DMC Press Publ., 2004. 432 p. (Rus.)
4. Emelin M.V. K voprosu otsenki termonapriazhennogo sostoiianiia i termoprochnosti chash shlakovozov [To the question of estimation the state and durability bowls of slag car]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and Mining Industry*, 2009, no. 2, pp. 103-108. (Rus.)
5. Loza A.V., Shishkin V.V., Dolia S.M., Kosolap M.V., Gladkii P.A., Osadchii O.V., Kiril'chenko P.M., Senokosov E.L., Astashin A.M., Tinenik R.V. *Chasha domennogo shlakovoza* [Bowl blast slag]. Patent UA, no. 49434, 2010. (Ukr.)
6. Sorokin V.G. *Marochnik staley i splavov* [Steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 639 p. (Rus.)
7. Loza A.V. Osobennosti izgotovleniia lito-svarnykh konstruktssii iz uglerodistykh staley [Features making of the weld-fabricated constructions from carbon steels]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Serii: Mekhaniko-tekhnologichni sistemi ta kompleksi – Bulletin of the National technical university «Kharkiv polytechnic institute»: Mechanical-technological systems and complexes*, 2016, no. 17 (1189), pp. 8-13. (Rus.)
8. Nakashima K. Fatigue properties of welded joints using steel with high resistance to fatigue crack growth. *Welding International*, 2010, vol. 24, no. 5, pp. 343-349.

Рецензент: В.И. Щетинина
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 17.10.2016