

УДК 621.791.052.5 – 412

А. В. ЛОЗА, В. В. ЧИГАРЁВ

**ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТО-СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

Рассмотрены вопросы надежности сварных соединений в комбинированных конструкциях. Определена возможность повышения качества лито-сварных соединений, изготовленных из углеродистых сталей с различной структурой. Проанализированы методы повышения механических и эксплуатационных свойств литых заготовок и их влияние на свойства сварного соединения. Показано, что выполнение специального промежуточного слоя с повышенными пластическими характеристиками в виде наплавки на литую заготовку приводит к уменьшению количества дефектов в околошовной зоне и повышению прочности металла в зоне сварного соединения в комбинированных стальных конструкциях.

**Ключевые слова:** сварные соединения, лито-сварные конструкции, углеродистая сталь, дефекты структуры, механические свойства.

Розглядаються питання надійності зварних з'єднань в комбінованих конструкціях. Встановлена можливість підвищення якості лито-зварних з'єднань, що виготовляються з вуглецевих сталей з різною структурою. Проаналізовані методи підвищення механічних та експлуатаційних якостей заготовок з литва та їх вплив на якості зварних з'єднань. Виконання спеціального проміжного шару з підвищеними пластичними характеристиками, як наприклад, наплавка на литу заготовку, призводить до зменшення числа дефектів в околошовній зоні та підвищенню міцності металу в зоні зварного з'єднання в комбінованих сталених конструкціях.

**Ключові слова:** зварні з'єднання, лито-зварні конструкції, вуглецева сталь, дефекти структури, механічні якості.

The article deals with the analysis of the properties of welded joints in combined structures. An opportunity of improving the quality of cast and welded, made of carbon steels with various structure was found out. Analyzed were the methods of improving mechanical and operational properties of cast blanks and their influence upon the properties of welded joints.

It was shown that application of a special intermediate layer with improved plastic characteristics deposited on a cast blank part could lead to a decrease in the number of defects in the vicinity of the weld's area and improvement of metal strength in the area of welded joints in combined steel structures.

**Keywords:** welded structures, cast and welded structures, carbon steel, defects of the structure, mechanical properties

**Введение.** Сварка является эффективным и надежным способом соединения конструктивно-сложных деталей в монолитные изделия при изготовлении оборудования различного назначения. Технология сварки разработана достаточно подробно для соединения широко применяемых сталей с однородной структурой. В то же время, при изготовлении некоторых видов специального оборудования экономически эффективным является применение лито-сварных конструкций, технология производства которых обладает рядом особенностей. Наибольший опыт по изготовлению лито-сварных и лито-деформированных конструкций накоплен в машиностроении для корпусных деталей, а также в авиастроении при изготовлении несущих узлов летательных аппаратов [1, 2]. Применение таких конструкций обусловлено стремлением повысить прочность изделий наиболее экономичным методом. Расширение номенклатуры изделий, изготавливаемых комбинированным способом, позволяет добиться значительного снижения металлоемкости и увеличения конструктивной прочности деталей и узлов в любой отрасли промышленности, что в современных условиях является важнейшей задачей любого производства, и в частности, в черной металлургии. В данной отрасли, несмотря на значительный технологический прогресс, часто встречаются случаи преждевременного выхода из строя крупногабаритных деталей по причине металлургических дефектов. Поэтому задача изготовления лито-сварных соединений с гарантированным качеством представляется как определенная проблема. В частности, такая проблема существует при соединении деталей и узлов из углеродистых сталей с различной структурой в единую конструкцию. Решение такой проблемы связано с оптимизацией конструкторских решений, технологии изготовления литых заготовок и сварочного производства.

**Анализ исследований и публикаций.** Практика показывает, что при использовании комбинированных изделий (например, лито-сварных) их качество и надежность зависят от большого числа факторов [3–5]. Суммарный ресурс работы конструкции может быть увеличен в случае выбора оптимальных инженерных решений на всех стадиях: конструирования, изготовления и также эксплуатации. Учет указанных этапов имеет особенно большое значение для изделий, которые играют роль силовых узлов. Для таких изделий первейшим вопросом является выбор материала, а также моделирование работы конструкции и выполнение прочностных расчетов. Например, в авиационной технике некоторые силовые рамы, узлы шасси и др. изготавливают сваркой литых и деформированных заготовок. При использовании различных материалов (сталей, алюминиевых, титановых, Al–Mg и Al–Li сплавов) неизбежно возникает проблема качества сварного соединения, которое определяется свойствами литых заготовок. При этом ни на одном этапе проектирования даже при наличии современных информационных технологий и вычислительной техники невозможно учесть особенности дефектов структуры литых заготовок, соединяемых в единый узел. Выполнение проектировочных и проверочных расчетов базируется на применении типовых схем нагружения для конструкций с однородными свойствами, которые задаются для каждого материала в среднем, в предположении отсутствия дефектов. Исследование разрушенных узлов показывает, что такой подход не всегда является верным. По этой причине сварные соединения в комбинированных конструкциях обычно являются слабым звеном в изделиях различного назначения.

В комбинированных сварных соединениях зона

© А. В. Лоза, В. В. Чигарёв .2016

структурной неоднородности представляет опасность с точки зрения понижения их качества и надежности. В углеродистых сталях зона структурной неоднородности может быть развита значительно, что оказывает существенное влияние на общую прочность лито-сварного изделия.

**Цель статьи.** Целью статьи является определение возможности повышения надёжности лито-сварных соединений, изготавливаемых из углеродистых сталей, которые наиболее часто используются в металлургии и машиностроении.

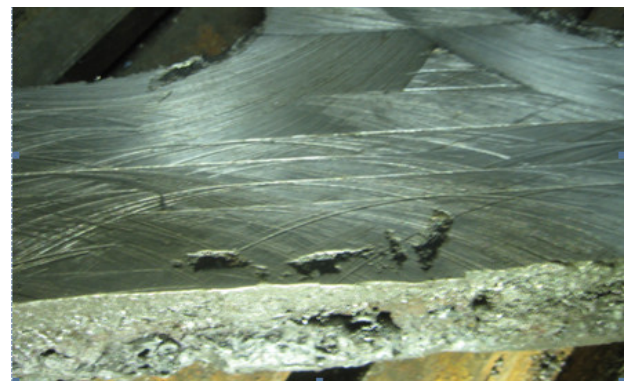
**Изложение основного материала – особенности изготовления лито-сварных конструкций.** В металлургии и машиностроении большое количество литых изделий и заготовок производят из сталей 30Л, 35Л. Это объясняется комплексом механических свойств, которые удовлетворяют требованиям по изготовлению типовых деталей и отражены в справочной технической литературе. Приведенные в справочниках свойства указанных сталей позволяют изготавливать рычаги, балансиры, муфты, шкивы, кронштейны, чаши, станины, балки, бандажы, маховики и другие детали, работающие под действием средних статических и динамических нагрузок. Однако при исследовании механических характеристик обращает на себя внимание тот факт, что свойства литых заготовок в краевой и центральной части отливок могут значительно отличаться. Сравнение механических свойств образцов, отобранных от разрушенных изделий в нескольких зонах, показывает, что различие прочностных свойств отдельных участков одного изделия может определяться для углеродистых сталей десятками процентов. Такая особенность литых заготовок существенным образом сказывается на длительности эксплуатации многих, и особенно массивных изделий. Особенно большую роль указанный факт играет в случае использования литой заготовки с нестабильными свойствами в лито-сварном соединении, что необходимо учитывать на стадиях проектирования и производства. В случае дальнейшей обработки литой заготовки, например, механической, или при выполнении сварочных операций дефекты металлургического происхождения могут оказаться близко к поверхности и значительно повлиять на прочность и надежность сварного соединения и всей конструкции. Это подтверждается при экспериментальном исследовании свойств образцов от литых заготовок. В заготовке из стали 35Л, которая использовалась как полуфабрикат для лито-сварной конструкции, уточняли распределение механических свойств и характер залегания внутренних дефектов. Макро-структуру изучали в отливках толщиной 50–100 мм. При исследовании оказалось, что в стальных отливках указанных толщин распределение свойств и расположение дефектов не всегда соответствует общепринятым положениям. Согласно теоретическим представлениям, известным в технической литературе, дефекты усадочного происхождения должны быть сосредоточены в тепловых узлах, в частности – в центральной зоне Т-образного сечения отливки [6]. Наличие таких дефектов должно автоматически приводить к снижению механических свойств от периферии к центру. В исследованных промышленных отливках толщиной

60 мм из стали 35Л (рис. 1, а) дефекты усадочного происхождения оказались распределенными в периферийной зоне Т-образного сечения. Наличие внутренних дефектов вне центральной зоны поперечного сечения предполагает возможность выхода их на поверхность (рис. 1, б), что значительно ослабляет прочность конструкции и сокращает ресурс её работы.

При исследовании металла в поперечном сечении рассматриваемых образцов обнаружена значительная химическая неоднородность, связанная, по видимому, с послойным характером кристаллизации стальной отливки. Зафиксирован разброс механических свойств металла на участках, свободных от макродефектов: предел прочности изменялся от 460 до 740 МПа (отклонение составляет 60 % от средних значений).



а



б

Рис. 1 – Дефекты макроструктуры в сечении литой заготовки из стали 35Л: а – макротемплет поперечного сечения детали, б – вид с торца заготовки

Такой разброс свойств и распределение дефектов, возможно, связаны с нарушением технологии литья, например, на стадиях заливки металла в формы и дальнейшего охлаждения. На участках с внутренними дефектами макроструктуры образцы имели значение  $\sigma_b$  230–270 МПа. Анализируя структуру литых заготовок, нужно отметить, что при любой поточной технологии стального литья металл имеет повышенное количество неметаллических включений [7]. В крупных литых заготовках влияние этого негативного явления ещё более усиливается при малой скорости охлаждения отливок. Укрупнение и скопление неметаллических включений, что особенно проявляется при замедленной скорости кристаллизации, значительно ухудшает структуру стали (рис. 2) и негативно влияет на её механические свойства, прежде всего – на показатели пластичности. При испытаниях на растяжение (рис. 3) образцы из литой стали разрушаются хрупко,

без площадки текучести. Недостаток пластических свойств служит одной из причин преждевременного образования трещин в конструкциях, особенно в условиях циклического нагружения.

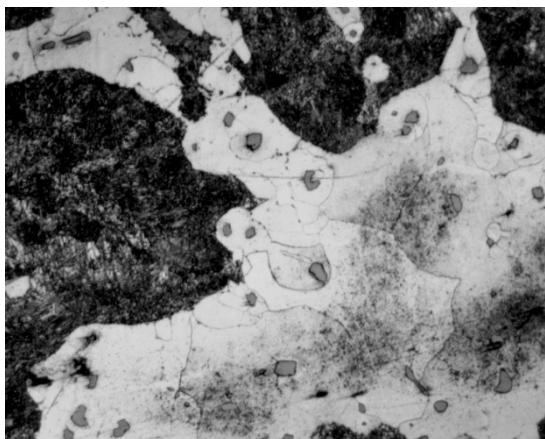


Рис. 2 – Структура литой стали 35Л с повышенным количеством неметаллических включений

В практике металлургического производства могут быть использованы промышленные методы по улучшению структуры металла литых заготовок и повышению их механических свойств. Путем увеличения скорости кристаллизации жидкой стали достигается существенное измельчение зерна и более плотная структура металла, что повышает его механические свойства. При этом технологам необходимо откоррек-

тировать технологию литья таким образом, чтобы обеспечить минимальное содержание неметаллических включений, вредных примесей и газов (прежде всего – H<sub>2</sub>) в тех областях заготовки, которые находятся максимально близко к зоне предполагаемой сварки. Эксперименты подтверждают положительное влияние технологии дополнительной обработки расплава на снижение содержания водорода в зоне сварного соединения.

Другим эффективным методом повышения механических и эксплуатационных свойств стальных литых заготовок является их комплексное микролегирование и модифицирование. Например, РЗМ, обладая большим сродством к примесям железоуглеродистых сплавов (S, N, O), связывают их в нерастворимые сульфиды, нитриды и оксиды. Это уменьшает негативное влияние примесей на свойства стали. Кроме того, мелкодисперсные продукты взаимодействия РЗМ с кислородом, азотом и серой увеличивают количество активных центров кристаллизации, которые влияют на скорость затвердевания и характер структуры углеродистых сталей, измельчая зерно металла. При этом создание дополнительных центров кристаллизации может увеличивать скорость затвердевания стали в 2–2,5 раза. Примером комплексного влияния нескольких химических элементов на механические свойства литой среднеуглеродистой стали может быть легирование её ванадием, марганцем и азотом (табл. 1).

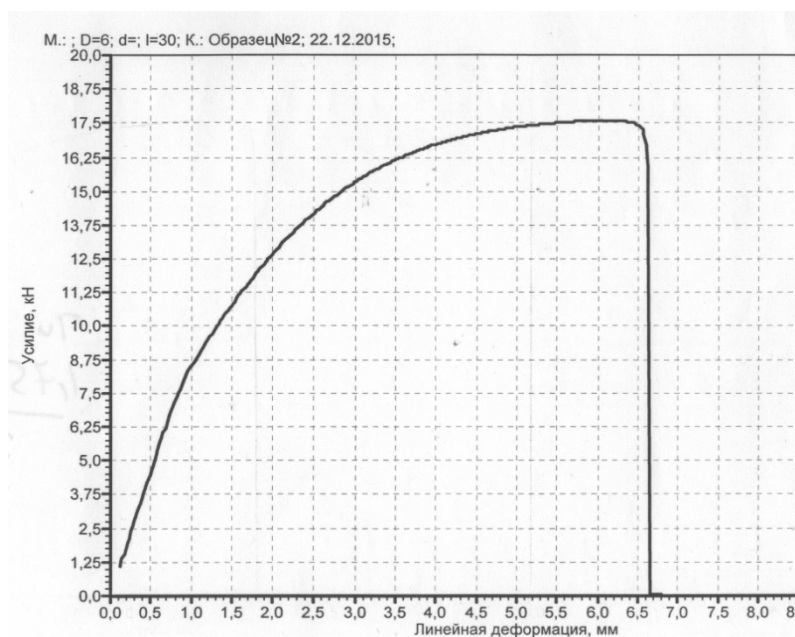


Рис. 3 – Диаграмма растяжения литой стали 35Л

Таблица 1 – Механические свойства исследованных сталей 35Л, 35ФЛ [8]

| Марка стали | $\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % | $\psi$ , % | НВ  | $a_n$ , кгс /см <sup>2</sup> при <sup>0</sup> С |     |     |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------|------------|-----|---|-----|-----|
|             |                                 |                                 |              |            |     | +20   | -40 | -60 |
| 35Л         | 60,1                            | 37,2                            | 28,0         | 30,0       | 160 | 3,9   | 2,6 | 1,7 |
| 35ФЛ        | 67,6                            | 43,1                            | 20,4         | 35,6       | 186 | 3,6   | 2,2 | 1,4 |

Анализ механических свойств, представленных в табл. 1, показывает, что легированием можно обеспечить повышение механических свойств на 10–20 % (по литературным данным – до 30 %), что не может компенсировать снижение механических характеристик (50 % и более) от внутренних физических неоднородностей.

Особенность литой структуры проявляется в том, что при наличии микродефектов и неметаллических включений в области ОШЗ комбинированного сварного соединения вблизи линии сплавления возникает неоднородность в виде цепочки рядом со швом (рис. 4), что значительно влияет на прочность металла. В сварных соединениях механическая неоднородность, как правило, ухудшает их прочность [9]. При сложных условиях нагружения деталей разрушение металла может проходить по области наибольшего скопления включений, которые являются дополнительными концентраторами напряжения.

Расположение неметаллических включений в виде цепочки существенно ослабляет зону сварного соединения, а повышенная газонасыщенность приводит к диффузии  $H_2$  из основного металла в сварной шов. В связи с этим, при производстве комбинированных конструкций должны быть применены методы увеличения прочности зоны сварного соединения. В комбинированных конструкциях из разнородных сталей [10] переходная зона имеет более низкие показатели прочности и пластичности по сравнению с другими областями металла. В таких условиях значительную роль играет выбор материала композиции в комбинированной конструкции и режим выполнения сварки. При этом задача обеспечения прочности сварного со-

единения заключается в обеспечении таких свойств шва и околошовной зоны, чтобы они превышали механические свойства менее прочного металла в композиции (рис. 5).

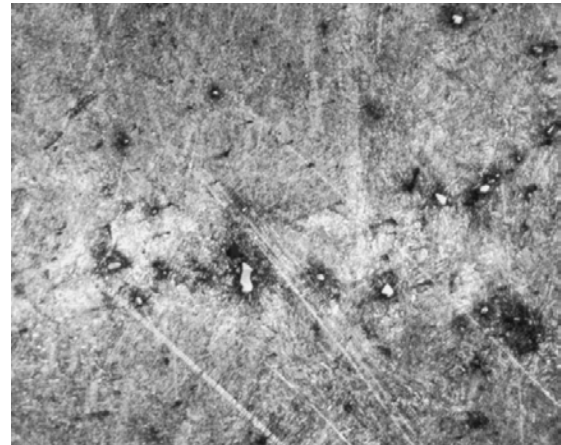


Рис. 4 – Дефекты литой заготовки из стали 35Л в зоне сварного шва

В этом случае разрушение комбинированной конструкции будет происходить не по зоне структурной неоднородности в сварном соединении, а по основному металлу с более низкими механическими свойствами (рис. 6).

Одним из способов упрочнения является выполнение специального промежуточного слоя с повышенными пластическими характеристиками. Такой слой может быть создан наплавкой с применением электродов УОНИ 13/45, 13/55.

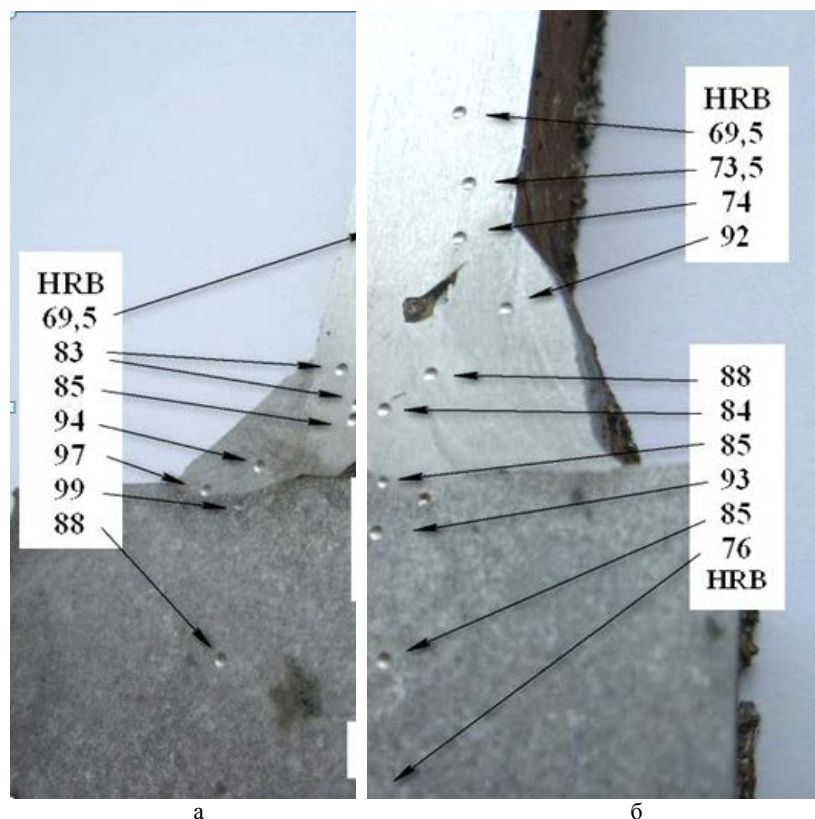


Рис. 5 – Распределение твердости в лито-сварном соединении (ребро жесткости из стали 09Г2С на основном металле литой заготовки из стали 35Л) при различных режимах сварки: а – режим 1, б – режим 2



Рис. 6 – Разрушение разрывных образцов в сварных соединениях композиции 35Л-09Г2С: а – шов Т10, б – шов Т8

При этом достигается изменение структуры литого металла в зоне соединения, а также могут быть заплавлены возможные дефекты макроструктуры в приповерхностных слоях заготовки (рис. 7). При выполнении промежуточного слоя отмечается значительно меньшее содержание неметаллических включений в сварном шве, что увеличивает его прочность. При испытании на растяжение цилиндрических образцов разрыв происходит не по зоне сплавления, а по основному металлу. Уровень прочности всей конструкции определяется свойствами менее прочной составляющей. Значительное влияние на качество и надежность лито-сварного соединения оказывает химический состав литья в зоне сварки. При содержании углерода по верхнему пределу в стали 35Л при сварке возможно возникновение трещин. Для предупреждения их возникновения необходимо применение предварительного подогрева литых заготовок перед сваркой.



Рис. 7 – Фрагмент опытного образца из стали 35Л с наплавленным промежуточным слоем на заготовке с литейными дефектами

### Выводы

1. Для повышения качества лито-сварных соединений из углеродистых сталей необходимо регламентировать в технической документации свойства литых заготовок, содержание примесей и размер макродефектов в зоне сварного соединения.
2. При соблюдении специальной технологии выполнения сварного соединения прочность лито-сварной конструкции из углеродистых сталей лимитируется свойствами её менее прочной составляющей.

Для увеличения прочности металла в сварном соединении необходимо применение специального промежуточного слоя с повышенными пластическими свойствами по отношению к литому металлу. Такой слой может быть выполнен путем наплавки.

3. Выбор материала в комбинированной конструкции, а также режима сварки определяет её прочность и характер разрушения. Работу конструкций из разнородных сталей можно прогнозировать, если их разрушение будет происходить не по зоне структурной неоднородности, а по основному металлу с заданным уровнем механических свойств.

### Список литературы:

1. Братухин, А. Г. Прогрессивные методы производства комбинированных конструкций и свойства алюминиевых лито-деформированных сварных соединений [Текст] / А. Г. Братухин, Н. С. Постников // Вестник машиностроения. – 1992. – № 8–9. – С. 35–37.
2. Фридляндер, И. Н. Высокопрочные, жаропрочные и коррозионностойкие алюминиевые и магниевые сплавы, композиционные материалы на их основе [Текст] / И. Н. Фридляндер // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ: Юбилейный сборник. – М.: МИСИС, ВИАМ, – 2002. – С. 198–220.
3. Братухин, А. Г. Концепция и металлургические особенности производства лито-деформированных конструкций [Текст] / А. Г. Братухин, Е. Б. Глотов, В. И. Лукин // Сварочное производство. – 1993. – С. 2–4.
4. Моисеенко, В. П. Материалы и их поведение при сварке: учебное пособие для вузов [Текст] / В. П. Моисеенко. – Ростов н/Д: Изд-во Феникс. – 2009. – 300 с.
5. Земзин, В. Н. Сварные соединения разнородных сталей: Монография [Текст] / В. Н. Земзин. – М.: Машиностроение, 1966. – 232 с.
6. Жегур, А. А. О питании Т-образных термических узлов при литье по выплавляемым моделям [Текст] / А. А. Жегур, С. И. Репях // Литейное производство. – 2010. – № 12. – С. 15–19.
7. Чигарев, В. В. Повышение качества отливок из углеродистых сталей [Текст] / В. В. Чигарев, Д. А. Рассохин, А. В. Лоза // Металл и литьё Украины. – 2012. – № 1 (224). – С. 23–26.
8. Филиппенков, А. А. Влияние ванадия, азота и марганца на механические свойства и кинетику роста зерна аустенита литой стали 35Л [Текст] / А. А. Филиппенков, Г. С. Кудрявцев и др. // Литейное производство. – 1973. – № 6. – С. 19–20.
9. Дильман, В. Л. Напряженное состояние и прочность сварных соединений с механической неоднородностью [Текст] / В. Л. Дильман, А. А. Остемин // Сварочное производство. – 1998. – № 5. – С. 15–17.
10. Готальский, Ю. Н. Сварка разнородных сталей: Монография [Текст] / Ю. Н. Готальский. – Киев, Изд-во «Техніка», 1981. – 184 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Bratukhin, A. G., Postnikov, N. S. (1992). Progressivnyye metody proizvodstva kombinirovannykh konstruktсий i svoystva alyuminievykh lito-deformirovannykh svarnykh soedineniy. Vestnik mashinostroeniya., 8–9, 35–37.
2. Fridlyander, I. N. (2002). Vysokoprochnyye, zharoprochnyye i korroziionnostoykie alyuminievye i magnievye splavy, kompozitsionnyye materialy na ikh osnove Aviatsionnyye materialy. Izbrannyye trudy VIAM: Yubileynyy sbornik. Moscow: MISIS, VIAM, 198–220.
3. Bratukhin, A. G., Glotov, E. B., Lukin V. I. (1993). Kontseptsiya i metallurgicheskie osobennosti proizvodstva lito-deformirovannykh konstruktсий. Svarochnoe proizvodstvo, 2–4.
4. Moiseenko, V. P. (2009). Materialy i ikh povedenie pri svarke: uchebnoe po-sobie dlya vuzov. Rostov n/D: Izd-vo Feniks, 300.
5. Zemzin, V. N. (1966). Svarnyye soedineniya raznorodnykh staley: Monografiya. Moscow, Mashinostroenie, 232.
6. Zhegur, A. A., Repyakh, S. I. (2010). O pitanii T-obraznykh termicheskikh uzlov pri lit'e po vyplavlyаемым modelyam. Liteynoe proizvodstvo, 12, 15–19.
7. Chigarev, V. V., Rassokhin, D. A., Loza, A. V. (2012). Povyshenie kachestva otlivok iz uglerodistykh staley. Metall i lit'ye Ukrainy, 1 (224), 23–26.
8. Filippenko, A. A., Kudryavtsev, G. S. i dr. (1973). Vliyaniye vanadiya, azota i margantsa na mekhanicheskie svoystva i kinetiku rosta zerna austenita litoy stali 35L. Liteynoe proizvodstvo, 6, 19–20.
9. Dil'man, V. L., Ostsemin, A. A. (1998). Napryazhennoe sostoyaniye i prochnost' svarnykh soedineniy s mekhanicheskoy neodnorodnost'yu. Svarochnoe proizvodstvo, 5, 15–17.
10. Gotal'skiy, Yu. N. (1981). Svarka raznorodnykh staley: Monografiya. Kiev, Izd-vo «Tekhnika», 184.

Поступила (received) 30.03.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Особенности изготовления лито-сварных конструкций из углеродистых сталей/ А. В. Лоза, В. В. Чигарёв**// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С8–13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Особенности изготовления лито-сварных конструкций из углеродистых сталей/ А. В. Лоза, В. В. Чигарёв** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.8–13. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

**Peculiarities of manufacturing of cast and welded structures of carbon steels/ A. V. Loza, V. V. Chigarev**//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189).– P.8–13. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Лоза Аркадій Васильевич** – старший преподаватель, Кафедра теоретической и прикладной механики, Приазовский государственный технический университет, пер. Университетский, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500; тел.: 097-338-29-75; e-mail: [loza\\_a\\_v@pstu.edu](mailto:loza_a_v@pstu.edu).

**Лоза Аркадій Васильович** – старший викладач, Кафедра теоретичної і прикладної механіки, Приазовський державний технічний університет, пров. Університетський, 7, м. Маріуполь, Україна, 87500; тел. : 097-338-29-75; e-mail: [loza\\_a\\_v@pstu.edu](mailto:loza_a_v@pstu.edu).

**Loza Arkadiy Vasilyovich** – Lecture of the department of theoretical and applied Mechanics of Pryazovskyi State Technical University, vul. Universytetska, 7, Mariupol, 87500 Ukraine; tel: 097-338-29-75; e-mail: [loza\\_a\\_v@pstu.edu](mailto:loza_a_v@pstu.edu).

**Чигарёв Валерий Васильевич** – Академик АИНУ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургия и технология сварочного производства», Приазовский государственный технический университет, пер. Университетский, 7, г. Мариуполь, Украина, 87500; тел.: 068-780-40-35; e-mail: [chigarew07@rambler.ru](mailto:chigarew07@rambler.ru).

**Chigarev Valeriy Vasilyovich** – Doctor of technical sciences, professor of Pryazovskyi State Technical University, vul. Universytetska, 7, Mariupol, 87500 Ukraine; tel: 068-780-40-35; e-mail: [chigarew07@rambler.ru](mailto:chigarew07@rambler.ru)

**Чигарёв Валерій Васильович** – Академік АІНУ, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Металургія і технологія зварювального виробництва», Приазовський державний технічний університет, пров. Університетський, 7. Маріуполь, Україна, 87500; тел. 068-780-40-35; e-mail: [chigarew07@rambler.ru](mailto:chigarew07@rambler.ru).