

УДК 621.791

УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ЗВАРЮВАННЯ ЧАВУНУ

©Калін М. А., Ізотова К. О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Калін Микола Андрійович: ORCID: 0000-0002-4068-2718; svargof@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Ізотова Катерина Олександрівна: ORCID: 0000-0002-6585-6681; ant-izotov@yandex.ru; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Метою роботи є підвищення якості металу шва при електродуговому зварюванні чавуну шляхом удосконалення складу окисного покриття маловуглецевих електродів.

Експеримент проводили з додаванням у покриття мармуру, гематиту, кварцевого піску, оксиду хрому, алюмінієвого порошку, слюди й соди.

Перевірку зварювально-технологічних властивостей дослідних складів електродів проводили при електродуговому зварюванні сірого чавуну.

Установлений оптимальний склад покриття, яке забезпечує високу якість наплавленого металу (відсутність тріщин, зменшення ширини прошарку з підвищеною твердістю, зниження твердості) і гарні зварювально-технологічні властивості електродів при холодному зварюванні чавуну.

Структура металу шва троосто-сорбіт і дрібні включення ферита. Біля поверхні – структура типова для литої маловуглецевої сталі.

Ключові слова: окисне покриття; чавун; зварювання; електроди; твердість.

Калин Н. А., Изотова Е. А. «Усовершенствование электродов для холодной сварки чугуна».

Целью работы является повышения качества металла шва при электродуговой сварке чугуна путем усовершенствования состава окислительного покрытия малоуглеродистых электродов.

Эксперимент проводили с добавлением в покрытие мрамора, гематита, кварцевого песка, оксида хрома, алюминиевого порошок, слюды и соды.

Проверку сварочно-технологических свойств опытных составов электродов проводили при электродуговой сварке серого чугуна.

Установлен оптимальный состав покрытия, которое обеспечивает высокое качество наплавленного металла (отсутствие трещин, уменьшение ширины прослойки с повышенной твердостью, снижение твердости) и хорошие сварочно-технологические свойства электродов при холодной сварке чугуна.

Структура металла шва троосто-сорбит и мелкие включения ферита. Близ поверхности – структура типичная для литой малоуглеродистой стали.

Ключевые слова: окислительное покрытие; чугун; сварка; электроды; твердость.

Kalin N., Izotova S. “Improvement of electrodes for the cold welding of cast-iron”.

The aim of work is upgrading of metal of guy-sutures at the tlektrik welding of cast-iron by the improvement of composition of oxidizing coverage of low-carbon electrodes.

An experiment was conducted with adding to coverage of marble, anhydroferrite, quartz sand, oxide of chrome, aluminium, mica and soda.

Verification of welding-technological properties of the experienced compositions of electrodes was conducted at the electric welding of grey cast-iron.

Optimal composition of coverage which provides high quality of velding metal (absence of cracks, diminishing of width of layer with enhanceable hardness, decline of hardness) and good welding-technological properties of electrodes at the cold welding of cast-iron is set.

A structure of metal of guy-sutures is troosto-sorbit and shallow including of ferit. Near a surface is a structure typical for the cast low-carbon steel.

Keywords: oxidizing coverage; cast-iron; welding; electrodes; hardness.

1. Постановка проблеми

У чавунних виливках на різних стадіях обробки виявляються різні дефекти. Крім того, знижена міцність і висока крихкість сірих чавунів приводять в окремих випадках до поломки в процесі експлуатації виготовлених з них деталей, а це у свою чергу, приводить до виходу з ладу або простою устаткування [1–3].

Для усунення дефектів у чавунних виливках і при ремонті деталей, що вийшли з ладу, широко застосовують зварювальні процеси.

2. Аналіз останніх досліджень

Заслуговують на увагу роботи, проведені П. С. Елістратовим, по розробці електродів типу СЧС на дроті Св-08 з покриттям окисного виду. В умовах високотемпературної фази зварювальної дуги вуглець є самим активним розкислювачем. Окислений вуглець у вигляді газу СО видаляється зі зварювальної ванни. Велика товщина покриття й високі значення зварювального струму, застосовуваного при зварюванні електродами СЧС, не дозволили встановити оптимальні межі технологічності електродів [1].

3. Експериментальна частина

Метою даної роботи є створення електродів для холодного зварювання чавуну на стрижнях із дроту Св-08А и покриттям, що містить кисневмісний компонент – гематит, що відрізняються від електродів марки СЧС поліпшеними зварювально-технологічними властивостями й високою якістю наплавленого металу за рахунок зміни шлакової й легуючої системи покриття.

Це завдання вже намагався вирішити у своїх роботах П. С. Елістратов, розробивши електроди марки СЧС, що містять у своєму покритті по 50 % мармуру й гематиту. Як електродні стрижні використовувався зварювальний дріт Св-08А. При зварюванні чавуну електродами СЧС утвориться високовуглецевий, сталевий зварний шов.

Для виготовлення дослідних партій електродів використовувався лабораторний прес. Стрижні електродів зі сталевого зварювального дроту марки Св-08А за ГОСТ 2246-70 діаметром 3 і 4 мм.

У якості розкислювача металу шва застосовувався алюмінієвий порошок марки ПАП-1 по ГОСТ 4135-48. Як окисний компонент застосовували гематит Fe_2O_3 по ГОСТ 4418-75.

Коефіцієнт ваги покриття електродів становив 0,45...0,47 при товщині покриття на сторону 0,8 мм електродів діаметром 3 мм, і 1 мм – електродів діаметром 4 мм. Автоматичне визначення коефіцієнта маси покриття робили за допомогою приладу БИА-100. Виготовляли 5 варіантів електродів (таблиця 1). Для порівняння виготовляли електроди СЧС.

Технологія машинобудування

Зварювання й наплавлення зразків для випробування твердості й хімічного складу металу шва й наплавленого металу, а також зварювально-технологічних властивостей електродів, відповідно до вимог ГОСТ 9466-75, робили як на змінному, так і постійному струмі прямої й зворотної полярності. Як джерела живлення застосовували зварювальний трансформатор ТД-502.В3 і випрямляч ВДУ-504. Сила струму для електродів діаметром 3 мм становила 100...120А, а для електродів діаметром 4 мм – 160...180 А.

Таблиця 1 – Склад покриттів дослідних варіантів електродів

Компоненти покриття	Вміст компонентів, мас %					
	СЧС	1	2	3	4	5
Мармур	50	12,5	25	12	10	8
Гематит	50	80	60	70	62,5	60
Кварцовий пісок	-	4	5	7	12	13
Окис хрому	-	0,5	1	2	3	4
Алюмінієвий порошок	-	1	2	4	5	7
Слюда	-	2	6	4	5	7
Сода	-	0,3	1	1	1,5	2

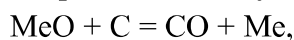
Для виготовлення зварних зразків використовували пластини із чавуну марки СЧ21 по ГОСТ 1412-85 товщиною 30 мм. Твердість металу шва й наплавленого металу вимірювали на приладі ТК-2 (по шкалі С), мікротвердість заміряли на приладі ПМТ-3, при навантаженні 100 г.

Загальний характер мікроструктури зварених швів оцінювали за допомогою оптичного мікроскопа МИМ-8М на поперечних мікрошліфах розміром 15x25x30 мм, протравлених в 5 %-ному спиртовому розчині азотної кислоти.

4. Результати досліджень

Процес окислення вуглецю й кремнію сірого чавуну за рахунок кисню, уведеного в зону зварювальної дуги можна представити в такий спосіб.

Ванна рідкого металу, де в основному проходить процес окислення вуглецю чавуну, являє собою рідке залізо з розчиненими в ньому домішками вуглецю, кремнію й ін. Кисень, що попадає у зварювальну ванну, також перебуває в розчині у вигляді оксидів, тому окислення вуглецю можна представити рівнянням виду



де MeO – розчинені оксиди металів

Вигорання вуглецю в газовій, шлаковій і металевій фазах при зварюванні плавленням у результаті взаємодії з киснем оксидів металів є різко вираженим ендотермічним процесом, що розвивається при високих температурах.

На підставі виконаних термодинамічних розрахунків реакцій відновлення оксидів кремнію, титана й алюмінію розчиненим у сплаві Fe-C вуглецем виведені формули розрахунку рівноважних з вуглецем вмістів відновлених елементів залежно від температури (таблиця 2).

З огляду на те, що масовий вміст вуглецю [C] у наплавленому металі не повинен перевищувати 0,12 %, зроблений розрахунок вмісту відновлених елементів (таблиця 3). Температура кристалізації металу шва прийнята рівної 1810 К.

Як видно з таблиці 2, найбільш імовірним, буде відновлення титана з TiO, що утвориться при дисоціації TiO₂ у зварювальній дузі. Імовірність відновлення титана з інших оксидів і ільменіту мізерно мала.

Таблиця 2 – Формули розрахунку рівноважних з вуглецем вмістів кремнію, титана й алюмінію

Реакції взаємодії	Константа рівноваги реакції	Формула розрахунку вмісту відновленого елемента в наплавленому металі
$(\text{Si}_2)+2[\text{C}]=[\text{Si}]+2\{\text{CO}\}$	$\lg K_{\text{Si-C}}=-29024/T+16,1$	$[\text{Si}]=K_{\text{Si-C}} [\text{C}]^2=1,176[\text{C}]^2$
$(\text{Ti}_2)+2[\text{C}]=[\text{Ti}]+2\{\text{CO}\}$	$\lg K_{\text{Ti-C}}=-32014/T+15,95$	$[\text{Ti}]=K_{\text{Ti-C}} [\text{C}]^2=0,0184[\text{C}]^2$
$(\text{Ti})+[\text{C}]=[\text{Ti}]+\{\text{CO}\}$	$\lg K_{\text{Ti-C}}=-16815/T+8,70$	$[\text{Ti}]=K_{\text{Ti-C}} [\text{C}]=0,25[\text{C}]$
$1/3(\text{Ti}_3\text{O}_5)+5/3[\text{C}]=[\text{Ti}]+5/3\{\text{CO}\}$	$\lg K_{\text{Ti-C}}=-27587/T+13,22$	$[\text{Ti}]=K_{\text{Ti-C}} [\text{C}]^{5/3}=0,0095[\text{C}]^{5/3}$
$1/2(\text{Ti}_2\text{O}_3)+3/2[\text{C}]=[\text{Ti}]+3/2\{\text{CO}\}$	$\lg K_{\text{Ti-C}}=-25572/T+12,19$	$[\text{Ti}]=K_{\text{Ti-C}} [\text{C}]^{3/2}=0,0115[\text{C}]^{3/2}$
$(\text{Fe}\cdot\text{Ti}_2)+3[\text{C}]=[\text{Ti}]+\text{Fe}+3\{\text{CO}\}$	$\lg K_{\text{Ti-C}}=-35895/T+19,43$	$[\text{Ti}]=K_{\text{Ti-C}} [\text{C}]^3=0,392[\text{C}]^3$
$1/2(\text{Al}_2\text{O}_3)+3/2[\text{C}]=[\text{Al}]+3/2\{\text{CO}\}$	$\lg K_{\text{Al-C}}=-30106/T+13,46$	$[\text{Al}]=K_{\text{Al-C}} [\text{C}]^{3/2}=0,00068[\text{C}]^{3/2}$

Таблиця 3 – Масовий вміст у наплавленому металі, %, відновлених з оксидів елементів при $[\text{C}] = 0,12\%$

Восстанов- лений елемент	SiO_2	TiO_2	TiO	Ti_3O_5	Ti_2O_3	$\text{Fe}\cdot\text{TiO}_2$	Al_2O_3
Si	0,02	-	-	-	-	-	-
Ti	-	$2,65 \cdot 10^{-4}$	0,03	$2,77 \cdot 10^{-4}$	$4,76 \cdot 10^{-4}$	$6,77 \cdot 10^{-4}$	-
Al	-	-	-	-	-	-	$2,81 \cdot 10^{-5}$

Відновлення кремнію з SiO_2 забезпечує невеликий приріст вмісту $[\text{Si}]$, що не може істотно відбитися на зміні механічних властивостей наплавленого металу і його схильності до пороутворення. Відновлення алюмінію також незначне й не робить істотного впливу на зварювально-технологічні властивості електродів. Відновлення титана до 0,03 % у наплавленому металі впливає на здібнювання структури останнього й підвищення його механічних властивостей.

Мармур (CaCO_3) уводиться як газошлакоутворюючий компонент. При термічній дисоціації у зварювальній дузі при температурі близько 900 °C відбувається виділення C і CO_2 .

Кількість кисню, здатного брати участь у реакціях окислювання вуглецю становить 16 % від масової частки мармуру в покритті.

Оксид, що утвориться в результаті дисоціації, кальцію CaO переходить у шлакову фазу й сприяє очищенню металу шва від домішок фосфору.

Оптимальним вмістом мармуру в цій системі покриття є 10-25 %.

Оксид заліза у вигляді гематиту (залізної руди) уводиться з метою максимального випалювання вуглецю зі зварювальної ванни. Термічна дисоціація гематиту з виділенням вільного кисню починається в покритті електрода при температурі 700 °C.

Кількість вільного кисню, що виділяється при цьому, становить 30 %. Оптимальний вміст гематиту в покритті становить 60-75 %.

Оксид хрому Cr_2O_3 дисоціює у зварювальній дузі при температурі більше 2000 °C і виділяє вільний кисень у кількості 30 %.

Оптимальний вміст оксиду хрому в покритті становить 1-3 %.

Введення до складу покриття алюмінію в сполученні з гематитом утворить термітну суміш, що у процесі плавлення електрода взаємодіє по реакції



з виділенням великої кількості тепла.

Тепло, що утвориться в результаті термітної реакції, витрачається на розігрів покриття й електродного стрижня на ділянці, що прилягає до зони плавлення. Оптимальний вміст алюмінієвого порошку в покритті становить 2-5 %.

Технологія машинобудування

Введення до складу покриття кварцового піску (SiO_2) в оптимальній кількості 5-12 % забезпечує зміну коефіцієнта лінійного розширення шлаків, що приводить до його крихкості й легкому видаленню зі зварених швів, як при однопрохідному, так і багатопрохідному зварюванню.

Результати випробування зварювально-технологічних властивостей (таблиця 4) і якості наплавленого металу показують, що оптимальним є склад покриття варіанта №3, що забезпечує високу якість наплавленого металу (відсутність тріщин, зменшення ширини прошарку з підвищеною твердістю, зниження твердості) і гарні зварювально-технологічні властивості електродів при холодному зварюванні чавуну.

Таблиця 4 – Результати випробування зварювальних електродів

Елек- трод	Зварювально-технологічні властивості електрода	Кіль- кість пор на 100 мм шва, шт.	Твердість наплавленого металу, НВ	Кількість тріщин на 100 мм шва, шт	Ширина прошарку підвищен. твердості, мм
СЧС	Формування шва – задовільне. Схильні до утворення пор і тріщин. Оброблюваність	5	207	3	0,8
1	незадовільна. Формування шва – задовільне. Схильність до утворення пор і тріщин	2	195	1	0,6
2	низька. Оброблюваність задовільна. Формування шва – гарне.	немає	180	немає	0,4
3	Схильність до утворення пор і тріщин низька. Оброблюваність гарна.	немає	170	немає	0,2
4	Формування шва – відмінне. Схильність до утворення пор і тріщин низька. Оброблюваність гарна.	немає	160	немає	0,15
5	Формування шва – гарне. Не схильні до утворення пор і тріщин. Оброблюваність - гарна.	3	165	немає	0,2
	Формування шва – задовільне. Схильні до утворення пор і зашлакувань. Оброблюваність гарна.	зашлаку- вання			

Для дослідження ступеня вигорання вуглецю з металу шва було зроблене багатошарове наплавлення висотою 20 мм досліджуваними електродами на механічно оброблену поверхню пластини із сірого чавуну марки СЧ 21 і зроблений хімічний аналіз металу шва по глибині із кроком 1 мм від верху наплавленого металу до основного металу (таблиця 5).

Для порівняння аналогічні дослідження хімічного складу металу шва були проведені для електродів марки СЧС (таблиця 6).

Технологія машинобудування**Таблиця 5** – Пошаровий хімічний склад металу шва електродів, у мас. %

Відстань від основного металу, мм.	C	Mn	Si	P	S
-	3,4	0,58	2,29	0,095	0,088
1	1,7	0,22	1,07	0,048	0,056
2	1,01	0,13	0,32	0,045	0,044
3	0,69	0,10	0,15	0,034	0,041
4	0,32	0,04	0,07	0,029	0,032
5	0,15	0,05	0,07	0,023	0,029
6	0,13	-	0,07	0,020	0,028
7	0,05	-	0,05	0,017	0,022
8	0,04	-	0,03	0,013	0,018
9	0,04	-	0,03	0,013	0,018
10	0,04	-	0,03	0,012	0,017
11-20	0,04	-	0,024	0,011	0,014

Таблиця 6 – Пошаровий хімічний склад металу шва електродів СЧС, у мас. %

Відстань від основного металу, мм.	C	Mn	Si	P	S
-	3,4	0,58	2,29	0,095	0,088
1	2,8	0,42	2,07	0,058	0,076
2	1,7	0,33	0,62	0,055	0,074
3	1,2	0,20	0,35	0,044	0,053
4	0,68	0,14	0,17	0,039	0,042
5	0,35	0,11	0,10	0,033	0,039
6	0,28	0,08	0,09	0,030	0,038
7	0,18	0,05	0,08	0,027	0,032
8	0,14	-	0,05	0,023	0,028
9	0,13	-	0,04	0,016	0,020
10	0,08	-	0,03	0,012	0,017
11-20	0,05	-	0,027	0,012	0,015

В металі, наплавленому розробленими електродами зі збільшенням відстані від основного металу вміст вуглецю в металі шва різко зменшується й досягає мінімально необхідних значень на висоті 6-7 мм.

При зварюванні електродами марки СЧС зниження вмісту вуглецю в металі шва менш інтенсивне й рівень вуглецю нижче 0,12 % досягається на висоті більше 10 мм, що відповідає третьому проходу.

Досліджували залежність твердості наплавленого металу від висоти шва. Виміри робили на шліфах тришаровому наплавленню в семи крапках із кроком в 1 мм.

Таблиця 7 – Твердість наплавленого металу, HRC

Варіант електрода	Номера крапок (зверху долілиць через 1 мм)						
	1	2	3	4	5	6	7
СЧС	18	55	48	46	42	35	20
УПА-Ч	18	43	38	30	20	17	16

Технологія машинобудування

Як видно з таблиці 7 твердість наплавленого металу зменшується по висоті шва. Максимальна твердість металу шва в зоні сплавки (крапка № 2).

Ширина зони термічного впливу, виявлена після металографічного травлення (рис. 1), становить 0,3- 0,35 мм.

Структура основного металу – пластинчастий графіт, матриця – сорбітообразний і тонкопластинчатий перліт з незначною кількістю ферита (рис. 2).

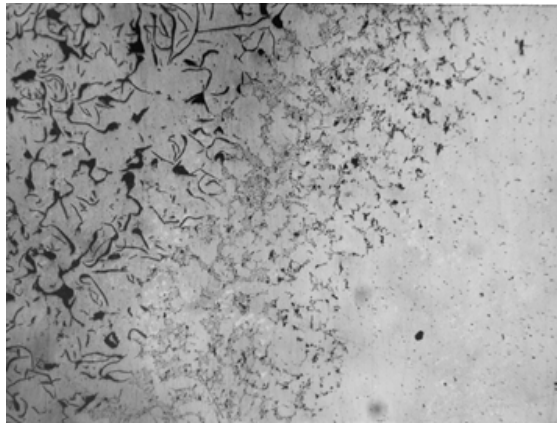


Рис. 1 – Зона сплавки чавун-сталь, x 100, нетруене

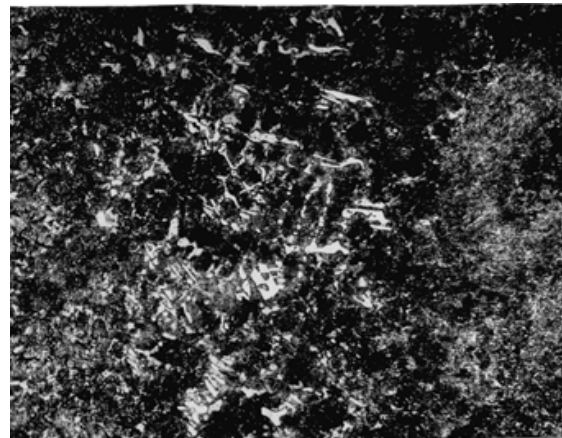


Рис. 2 – Мікроструктура зони сплавки чавун-сталь, x 450

Структура наплавленого металу в області, що безпосередньо прилягає до основного, являє собою крупні зерна троосто-сорбіту твердістю $H_{\mu} = 420$ (HRC = 43). Потім троостосорбіт $H_{\mu} = 322-420$ (HRC = 32-43) зі світлими ділянками троосто-мартенситу $H_{\mu} = 464$ (HRC = 46).

У міру віддалення – троосто-сорбіт і дрібні включення ферита $H_{\mu} = 254-350$ (HRC = 23-35).

Поблизу поверхні – структура типова для литої маловуглецевої сталі ($H_{\mu} = 170-254$).

Приступаючи до підготовки під зварювання різних дефектів на чавунних деталях і виливках, необхідно виявити границі їхнього поширення (візуальний огляд через 4-х кратну лупу, гасова проба й т.п.) і встановити форму оброблення. Зварювання високоміцного, сірого, а також ковкого чавуну дослідними електродами марки УПА-Ч здійснюється без попереднього підігріву виробів, що зварюються, переважно на постійному струмі зворотної полярності (можливі використання й змінного струму) з урахуванням наступних особливостей процесу:

Для зменшення утворення метастабільних структур (цементит, мартенсит) у зоні сплавки й одержання легкооброблюваного, якісного звареного з'єднання проплавити чавун треба мінімально. Остаточне заповнення оброблення виконують, або електродами УПА-Ч, або електродами з основним покриттям типу Э42А (наприклад, марки УОНИИ 13/45 і ін.) Останнє доцільно у випадках: зварювання чавуну зі сталлю, зварювання чавунних деталей товщиною більше 15-20 мм і заварки більших об'ємних дефектів.

Остаточне заповнення оброблення можна робити й методами напівавтоматичного й автоматичного зварювання в середовищі вуглекислого газу або під флюсом.

При одношаровому наплавленні або заварці дефекту для повної гарантії механічної оброблюваності місця зварювання рекомендується накладати на раніше наплавлений метал (не заходячи на основний) відпалюючі валики.

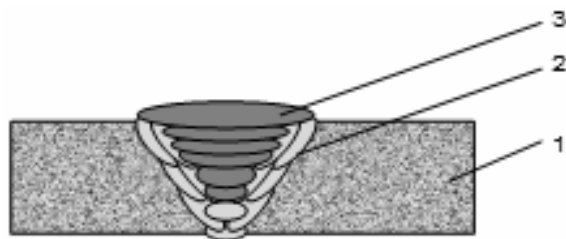


Рис. 3 – Схема зварки чавуну з попереднім облицюванням кромки електродами УПА-Ч і заваркою розробки електродами УОНІІ-13/45:

- 1 – основний метал – сірий чавун СЧ 21; 2 – наплавлений метал електродами УПА-Ч;
3 – метал шва, звареного електродами УОНІІ-13/45

Висновки

1. Розроблено склад покриття електродів для холодного зварювання сірого чавуну, що містить нову систему окислення вуглецю.
2. Склад покриття забезпечує високу якість наплавленого металу (відсутність тріщин, зменшення ширини прошарку з підвищеною твердістю, зниження твердості) і гарні зварювально-технологічні властивості електродів при холодному зварюванні чавуну.
3. Структура наплавленого металу в області, що безпосередньо прилягає до основного, являє собою крупні зерна троосто-сорбіту, потім троостосорбіт зі світлими ділянками троосто-мартенситу, у міру віддалення – троосто-сорбіт і дрібні включення ферита, поблизу поверхні – структура типова для литої маловуглецевої сталі.

Список використаних джерел:

1. Иванов Б. Г. Сварка и резка чугуна / Б. Г. Иванов, Ю. И. Журавицкий, В. И. Левченков. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Асиновская Г. А. Газовая сварка чугуна / Г. А. Асиновская, Ю. И. Журавицкий. – М. : Машиностроение, 1974. – 49 с.
3. Левченков С. И. Состояние и перспективы развития сварки чугуна: (обзор) / С. И. Левченков // Сварочное производство. – 1988. – № 2. – С. 2–4.

References

1. Ivanov, B, Zhuravitskiy, Yu & Levchenkov, V 1977, *Svarka i rezka chuguna*, Mashinostroyeniye, Moskva.
2. Asinovskaya, G & Zhuravitskiy, Yu 1974, *Gazovaya svarka chuguna*, Mashinostroyeniye, Moskva.
3. Levchenkov, V 1988, 'Sostoyaniye i perspektivy razvitiya svarki chuguna (obzor)', *Svarochnoye proizvodstvo*, no. 2, pp. 2-4.

Стаття надійшла до редакції 16 квітня 2015 р.