



УДК 621.791.048

© Э. Г. Бабенко, Е. Н. Кузьмичев, М. А. Колесников, 2013

ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЛЮСОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Бабенко Э. Г. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология металлов», тел.: (4212) 40-70-99; *Кузьмичев Е. Н.* – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловозы и тепловые двигатели», тел.: (4212) 40-75-81; *Колесников М. А.* – ст. преп. кафедры «Вагоны», тел.: (4212) 40-76-56, e-mail: lynxdv@mail.ru (ДВГУПС)

Рассмотрен вопрос повышения эффективности легирования переплавляемой при электрошлаковом переплаве низкоуглеродистой стали флюсами на основе минерального сырья. Приведены результаты исследований различных способов интенсифицирующих воздействий на процессы, протекающие в шлаковой ванне, направленных на повышение перехода легирующих элементов в переплавляемый металл. Исследованы состав и структуры полученных сплавов.

The work deals with the problem of enhancing efficiency for alloying remelted low-carbon steel. It was done in electroslag remelting process with using fluxes based on mineral raw materials. The investigation results of different ways of influence on the processes occurring in the molten weld pool are shown. The aim of the influence was to improve alloying degree of the remelted metal. The composition and microstructure of the alloys obtained were studied.

Ключевые слова: минеральное сырье, электрошлаковый переплав, управляющие воздействия, флюс, легирование, магнитное поле, электромагнитная сила.

Введение

Перспективным направлением исследований в области получения новых материалов является комплексное использование минерального сырья без его глубокой технологической переработки путем воздействия на него концентрированными потоками энергии [1 - 4]. Получаемые в результате материалы отличаются высокими свойствами и низкой себестоимостью.

Одной из подобных технологий является электрошлаковый переплав (ЭШП), дающий возможность легировать через шлаковую ванну низкоуглеродистую сталь концентратами, содержащими оксиды легирующих элементов. Однако при реализации этой технологии авторами установлено значи-



тельное количество (до 11 мас. %) легирующих компонентов в оставшихся после переплавов шлаках, что вызвало необходимость поиска решения этой проблемы.

Методика и материалы

Для проведения экспериментальных исследований был разработан опытный флюс на основе шеелитового концентрата, позволяющий осуществлять легирование переплавляемого металла вольфрамом. Состав флюса был оптимизирован методом ранжирования с учетом подбора типа восстановителя и его количества. Шихта опытного флюса включает в себя шеелитовый концентрат, флюоритовый концентрат и ферросилиций. Химический состав шихты опытного флюса приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав шихты опытного флюса, мас. %										
WO ₃	CaO	CaF ₂	Fe ₂ O ₃	FeSi	SiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	CaCO ₃	S	Прочие
40,83	16,41	18	2,81	12	2,69	1,12	3,14	0,58	0,42	2

Эксперименты проводились на установке для электрошлакового переплава, оснащенной медным водоохлаждаемым кристаллизатором. В качестве электродного материала использовалась низкоуглеродистая сварочная проволока марки Св-08А диаметром 3 мм, ГОСТ 2246-70. Переплав осуществлялся при напряжении 40...45 В током 400...500 А.

В результате переплава получали слитки диаметром 50 мм и высотой 70 мм. Элементный состав полученных образцов и оставшихся после переплава шлаков изучался с помощью рентгеновского спектрометра "Спектроскан МАКС-GV". Исследование микроструктуры сплавов проводилось с помощью металлографического микроскопа ЕС МЕТАМ РВ-21 при увеличении до $\times 1000$ и программно-аппаратного комплекса металлографического анализа «СпектрМет-5.6». Строение полученных материалов изучались на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 40HV в комплекте с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments INCA ENERGY X-Sight 350. Фазовый состав исследовался на рентгеновском дифрактометре "ДРОН-7" в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении.

Результаты и их обсуждение

При электрошлаковом переплаве ведущая роль с позиции формирования состава переплавляемого металла отводится жидкому шлаку. Важнейшими его функциями являются: обеспечение устойчивости технологического процесса, защита от влияния внешней среды, формирование состава получаемого сплава.

В связи с тем, что жидкий шлак представляет собой ионную систему [5], то среди отличительных признаков электрошлакового процесса важнейшим является электрический ток, наличие которого вызывает следующие явления:



– из-за относительно низкой электропроводности шлака возникает джоулево тепловыделение, за счет которого происходит плавление электродного материала;

– из-за неравномерного распределения плотности тока в шлаковой ванне температура в отдельных ее частях не одинакова, что вызывает тепловую конвекцию;

– электрический ток, взаимодействуя с собственным магнитным полем, приводит к появлению электромагнитной силы, также вызывающей конвекцию шлака [6].

Следовательно, явления переноса компонентов шлака, содержащих легирующие элементы, относятся к магнитной гидродинамике.

В связи с тем, что к жидкому шлаку извне подводится только электрический ток, то только он является источником движения в жидком расплаве за счет объемной электромагнитной силы и тепловой конвекции. Электромагнитная сила f_e закручивает жидкость в меридиональной плоскости в направлении, показанном на рис. 1. В соответствии с этим общее направление перемещения компонентов представляет собой вихревой тор с движением по его оси симметрии вниз от электрода и вверх от стенок кристаллизатора.

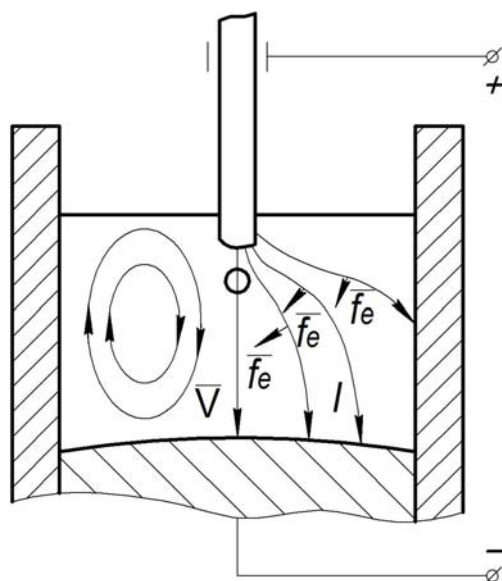


Рис. 1. Схема движения жидкого шлака: I – линия электрического тока; \vec{f}_e – направление электромагнитной силы; \vec{V} – направление движения расплава

Таким образом, шлаковая ванна представляет собой диссипативную систему, демонстрирующую незатухающие колебания, т.е. автоколебания.

Как показано в [7], образом периодических автоколебаний являются предельные циклы Пуанкаре – замкнутые фазовые траектории, к которым стремятся все соседние траектории. В отличие от фазовых траекторий гармонического осциллятора, предельные циклы являются аттракторами, т.е. притягивают к себе траектории из других областей фазового пространства.

В динамических системах автоколебания могут быть не только периодическими, но и квазипериодическими. Образом квазипериодических движений в фазовом пространстве является тор.

Значит, в рассматриваемом фазовом пространстве шлаковой ванны тор, являясь аттрактором, притягивает соседние траектории, в которых находятся легирующие элементы. Однако особенностью такого аттрактора является то, что траектории нигде не замыкаются, плотно «наматываясь» на поверхность тора. Это приводит к тому, что капля расплавленного электрода, проходя по оси тора, пересекает относительно небольшое количество фазовых траекторий, содержащих легирующие компоненты, т.е. создаются наименее благоприятные условия для легирования.

Одним из типов аттракторов в нелинейных системах является хаотический (рис. 2). Хаотические аттракторы демонстрируют фрактальные свойства своей структуры.

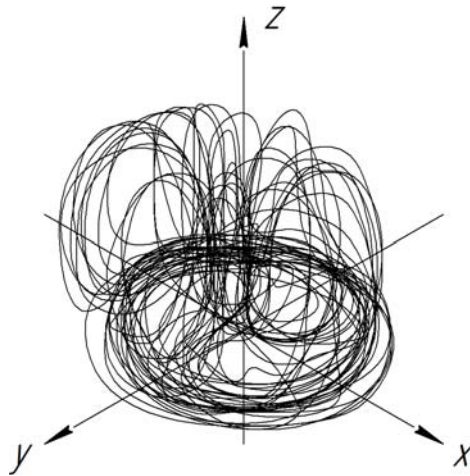


Рис. 2. Хаотический аттрактор

Одним из основных свойств хаоса является то, что даже самое малое воздействие достигает в итоге макроскопических размеров. Для возникновения хаоса необходимо, чтобы в фазовом пространстве системы все соседние траектории внутри некоторой области разбежались, и все они оставались внутри фазового объема, что имеет место в шлаковой ванне, ограниченной стенками кристаллизатора.



Если в фазовом пространстве имеется хаотический аттрактор, то при $t \rightarrow \infty$ будет перемешивание компонентов.

Следовательно, для повышения степени легирования переплавляемого металла в фазовом пространстве шлаковой ванны необходимо наличие вместо тора хаотического аттрактора.

Изменить направление движения расплава можно или за счет изменения направления линий электрического тока и, следовательно, электромагнитной силы, или воздействия внешних магнитных полей иного происхождения.

Этого можно достигнуть двумя способами:

– колебаниями электрода в горизонтальной плоскости или взаимными периодическими перемещениями электрода и кристаллизатора с жидким шлаком;

– воздействием на ионную систему жидкой шлаковой ванны внешним магнитным полем, вводимым через стенки кристаллизатора.

Для проверки эффективности первого способа авторами были разработаны, изготовлены и защищены патентом [8] устройства, позволяющие создавать механические колебания электрода с амплитудой до 20 мм и вибростол для периодического смещения кристаллизатора относительно электрода с частотой 5-15 Гц. А также использовалось ультразвуковое воздействие частотой 25 кГц и 1,6 ГГц для реализации высокочастотной вибрации электрода.

Воздействие магнитного поля изучалось с использованием электромагнита переменного тока.

В ходе экспериментов установлено, что при переплаве низкоуглеродистой стали без воздействия на шлаковую систему количество перешедшего в нее вольфрама составило 10,78 мас. % (табл. 2) при остаточном количестве в шлаке 4,83 мас. %.

При механическом воздействии на электрод и шлаковую ванну переход вольфрама увеличился в 4,04 и 2,33 раза соответственно и составил 43,57 и 25,08 мас. % (табл. 2), при уменьшении его в оставшемся шлаке в 5,2 и 2,4 раза.

Таблица 2

Химический состав сплава. Воздействие вибрацией

Вид воздействия	Содержание хим. элементов, мас. %					
	W	C	Si	P	S	W в шлаке после переплава
Без воздействия	10,78	0,022	0,24	0,13	0,03	4,83
Колебания электрода с амплитудой 17 мм	43,57	0,038	0,12	0,16	0,03	0,92
Колебания шлаковой ванны с частотой 8 Гц	25,08	0,037	0,21	0,19	0,04	2,03

Продолжение таблицы 2

Воздействие магнитным полем	29,02	0,039	0,14	0,16	0,04	1,81
Воздействие ультразвуком (1,6 ГГц)	19,07	0,047	0,18	0,16	0,04	2,76

При использовании магнитного поля количество вольфрама в сплаве увеличилось в 2,7 раза и сократилось в шлаке в 2,6 раза.

Установлено, что существенное влияние на степень легирования переплавляемой стали оказывают режимы воздействий на шлаковую систему (рис. 3-5).

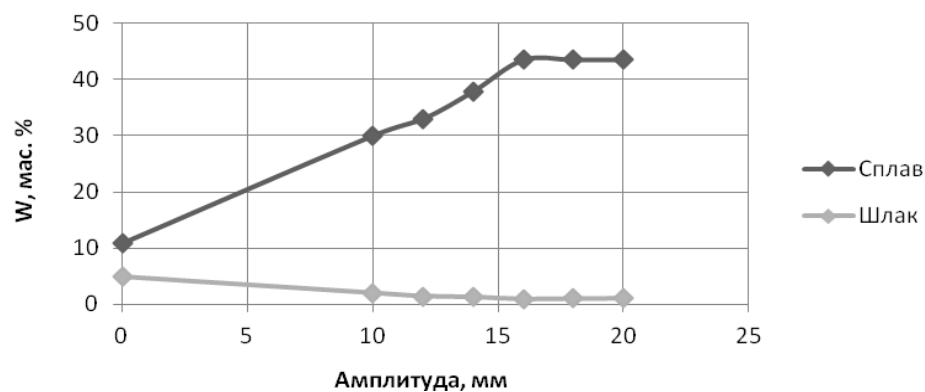


Рис. 3. Влияние амплитуды колебаний электрода на переход вольфрама в сплав и остаток в шлаке

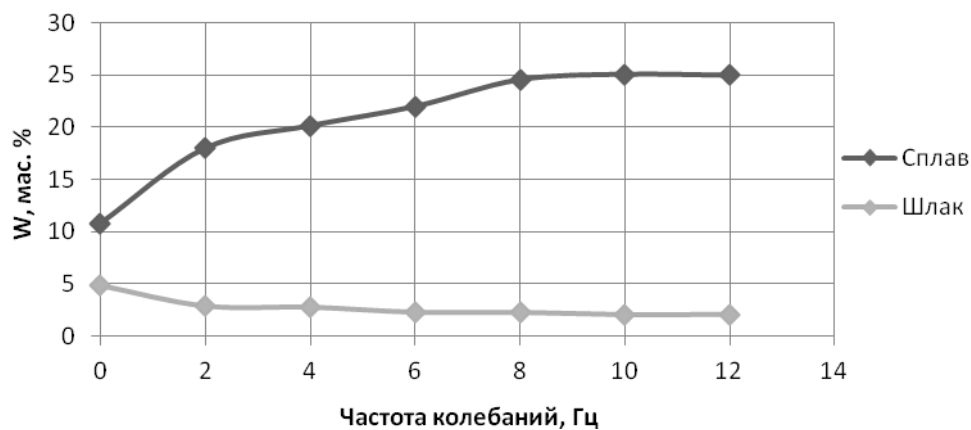


Рис. 4. Влияние частоты колебаний шлаковой ванны на переход вольфрама в сплав и остаток в шлаке

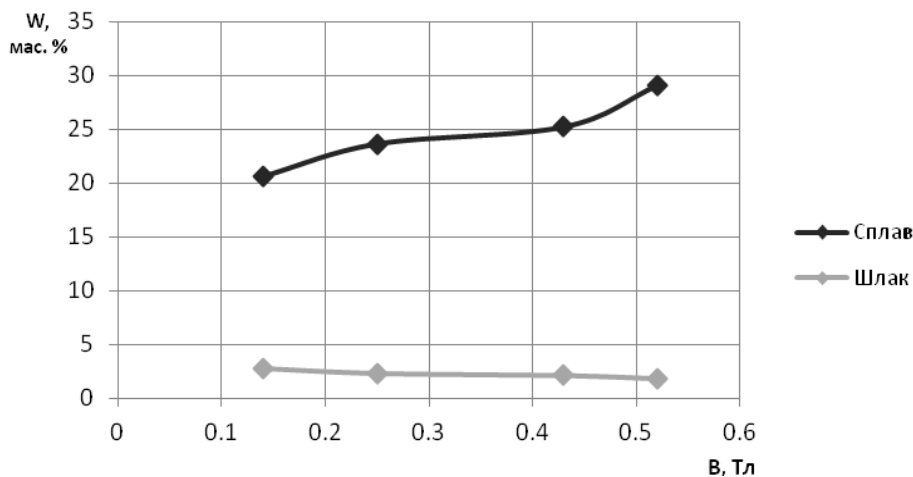


Рис. 5. Влияние величины магнитного поля на переход вольфрама в сплав и остаток в шлаке

При использовании ультразвука частотой 1,6 ГГц количество вольфрама в сплаве увеличилось в 1,77 раза, а в шлаке уменьшилось в 1,75 раза. При воздействии ультразвуком частотой 25 кГц значительного эффекта не обнаружено (рис. 6).

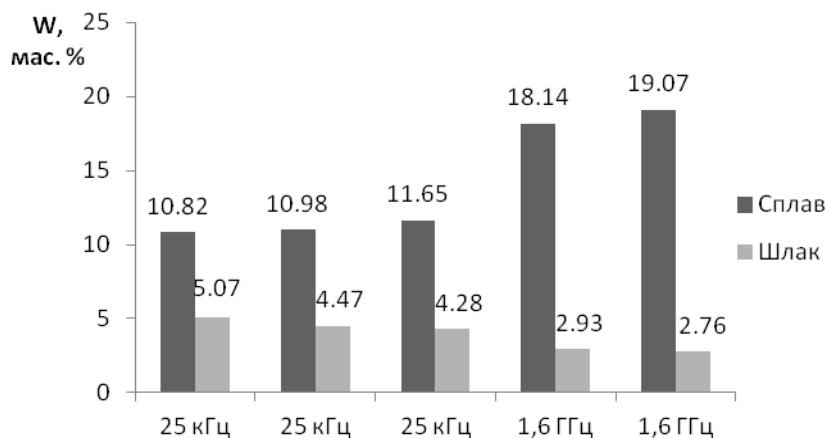


Рис. 6. Влияние ультразвукового воздействия на переход вольфрама в сплав и остаток в шлаке

На рис. 7 приведено содержание вольфрама в переплавленной стали и его количество в оставшемся шлаке, из которого видно, что наиболее благоприятные условия для перехода легирующего элемента в сплав создаются

при колебаниях электрода, а наименее благоприятные – при ультразвуковом воздействии.

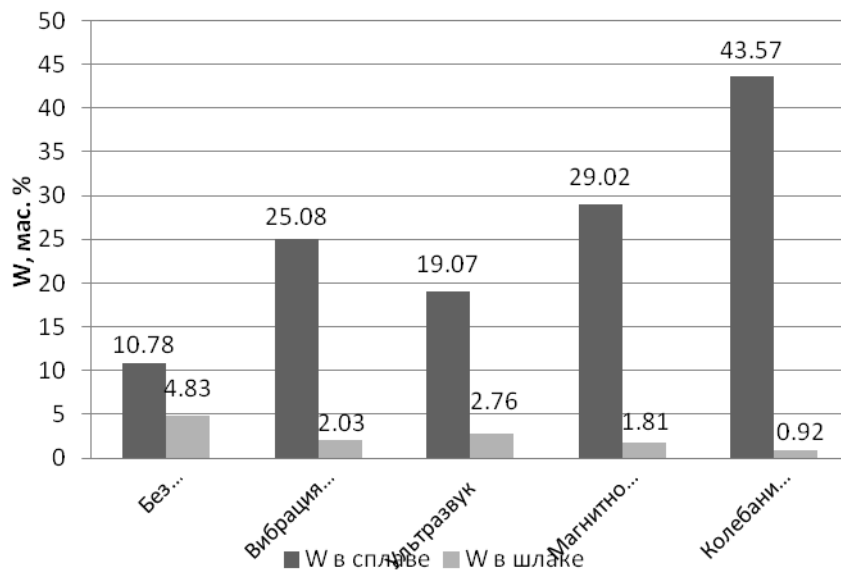


Рис. 7. Содержание вольфрама опытных сплавов и шлаках

Микроструктура сплава с максимальным содержанием вольфрама, полученная переплавом при колебаниях электрода амплитудой 17 мм, представлена на рис. 8. Вольфрам в сплаве, как показало сканирование в отраженных электронах, распределяется по объему сравнительно равномерно и согласно результатам рентгенофазового анализа, находится в составах легированного феррита и химического соединения Fe_7W_6 (рис. 9).

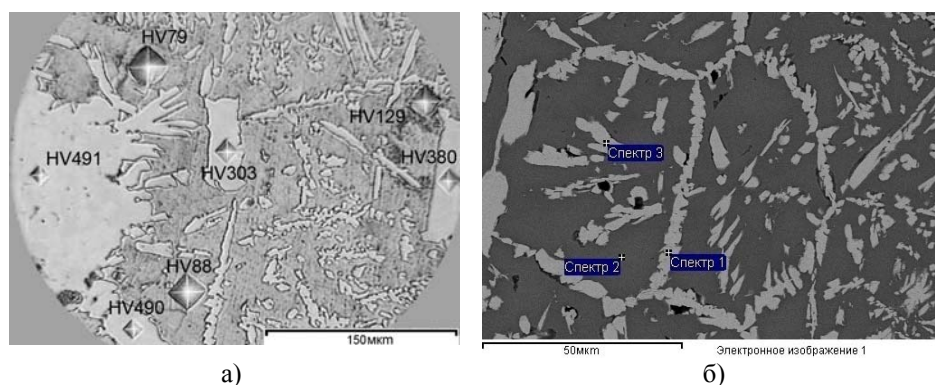


Рис. 8. Микроструктура опытного сплава: а) микротвердость фаз ($\times 630$); б) изображение в отраженных электронах

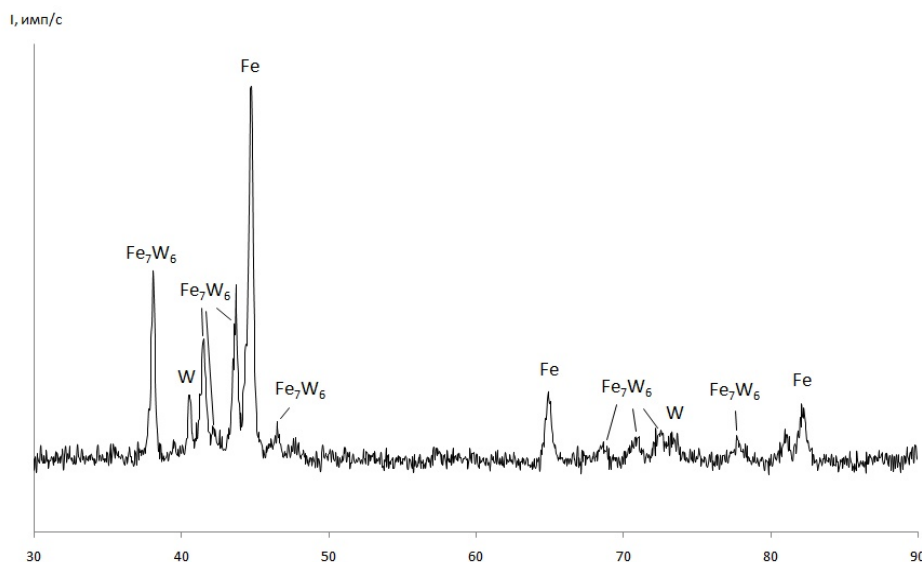


Рис. 9. Рентгенограмма сплава, полученного в условиях колебаний электрода

В сравнительно гомогенной матрице микровключения в основном располагаются по границам зерен в виде отдельных конгломератов или в виде вытянутых полос в зернах феррита.

Изображение образца в отраженных электронах зафиксировала резко обозначенные, неразмытые границы без взаимного проникновения фаз.

Полученный сплав может быть использован в качестве ферросплава для получения легированных сталей.

Выводы

1. Впервые исследована возможность повышения степени легирования низкоуглеродистой стали при ее электрошлаковом переплаве с непосредственным использованием минерального сырья, содержащего оксиды вольфрама, за счет воздействия на шлаковую ванну.

2. Разработаны технологические решения повышения перехода легирующего элемента из шлаковой ванны в переплавляемую низкоуглеродистую сталь. Установлено, что наибольший эффект достигается воздействием переменным электромагнитным полем и колебаниями электрода.

3. Получены сплавы с содержанием вольфрама до 43 мас. %, которые могут быть использованы в качестве ферросплавов.

4. Исследованы химические, структурные и фазовые составы сплавов, полученных с использованием разработанных технологий. Установлено, что вольфрам легирует феррит и образует интерметаллиды Fe_7W_6 .



Библиографические ссылки

1. *Бабенко Э.Г.* Основные аспекты транспортного минералогического материаловедения / Э. Г. Бабенко, А. Д. Верхотуров, В. Г. Григоренко. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 234 с.
2. *Бабенко Э. Г.* Применение новых флюсов из минерального сырья для электрошлаковой наплавки и переплава / Э. Г. Бабенко, Е. А. Лихачёв, М. А. Колесников // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. - № 10.
3. *Верхотуров А. Д.* Разработка и исследование легированных сталей, полученных электрошлаковым переплавом низкоуглеродистой стали с использованием минеральных ассоциаций / А. Д. Верхотуров, Э. Г. Бабенко, Е. Н. Кузьмичев // Перспективные материалы. – 2003. - № 1. - С. 67-72.
4. *Комков В. Г.* Восстановление деталей машин электрошлаковой наплавкой / В. Г. Комков, М. В. Тепляшин // Вестник ТОГУ. – 2013. – № 1. – С. 109-114.
5. *Подгаецкий В. В.* Сварочные шлаки / В. В. Подгаецкий, В. Г. Кузьменко. – Киев: Наукова думка, 1988. – 251 с.
6. *Компан Я. Ю.* Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами / Я. Ю. Компан, Э. В. Щербинин. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
7. *Безручко Б. П.* Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях / Б. П. Безручко, А. А. Короновский, Д. И. Трубецков и др. – М.: КомКнига, 2005. – 304 с.
8. *Пат. 2447978 МПК С2 В23К 25/00.* Устройство для электрошлаковой наплавки высоколегированной стали / Е. А. Дроздов, Э. Г. Бабенко, Е. Н. Кузьмичев, М. А. Колесников (Россия). – Заяв. № 2010121785/02 от 25.05.2010, опубл. 10.12.2011 Бюл. № 34.