

УДК 621.74

DOI 10.17073/0021-3438-2015-2-26-31

КАЧЕСТВО ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА «АЛЮМИНИЙ–УГЛЕРОД» ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТОКОПОДВОДОВ К АНОДАМ МАГНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

© 2015 г. В.А. Глушечков, А.А. Лазарева, Р.Ю. Юсупов, Д.Г. Черников

Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ)
им. акад. С.П. Королева (национальный исследовательский университет)*Статья поступила в редакцию 09.04.14 г., доработана 27.10.14 г., подписана в печать 26.11.14 г.*

Представлены результаты исследования границы раздела «металл–неметалл» при формировании электроконтактных пробок путем воздействия на расплав металла импульсным магнитным полем высокой напряженности. Показано, что предлагаемая магнитно-импульсная технология позволяет существенно снизить переходное электрическое сопротивление между электроконтактными пробками и анодным блоком электролизера за счет повышения плотности контакта.

Ключевые слова: электролизер, электроконтактная пробка, импульсное магнитное поле, расплав, переходное сопротивление, адгезия.

The results of investigation into the metal–nonmetal interface during the formation of electrocontact rods by means of the effect of the high-strength pulsed magnetic field on the melt are presented. It is shown that the proposed magnetic-pulsed technology makes it possible to considerably lower the transient electric resistance between electrocontact rods and anode block of the electrolyzer due to an increase in contact density.

Keywords: electrolyzer, electrocontact rod, pulsed magnetic field, melt, contact resistance, adhesion.

Введение

Одной из важнейших задач электрометаллургии, требующих постоянного внимания, является энергосбережение. При электролизе алюминия и магния необходимо снижать потери электроэнергии на границе между металлическим токоподводом и углеграфитовым блоком анода. Это приведет к увеличению ресурса работы токоподвода за счет уменьшения выделения тепла и эрозии контактного соединения. К последнему предъявляются два основных требования: низкое переходное электросопротивление границы раздела и высокие адгезионные свойства.

Ранее в работе [1] были описаны новый способ конструктивного оформления контактной зоны и

технология его реализации. Суть предложенного технического решения [1, 2] состоит в том, что в углеродном блоке изготавливаются каналы, в которые под динамической нагрузкой импульсного магнитного поля (ИМП) [3] нагнетается расплав, образуя так называемые литые электроконтактные пробки (ЭКП). В результате проведенных исследований получены модели углеграфитовых электродов с ЭКП.

Физика процесса магнитно-импульсного воздействия на расплав, форма электроконтактных пробок, технология их получения описаны в работах [1, 4–7], однако в них недостаточное внимание уделено качеству полученных соединений «ме-

Глушечков В.А. — канд. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, науч. руководитель лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» (НИЛ-41) СГАУ (443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34). Тел./факс: (846) 335-18-45. E-mail: imp@ssau.ru.

Лазарева А.А. — аспирантка той же кафедры, мл. науч. сотр. НИЛ-41. E-mail: anastasia-lazareva@yandex.ru.

Юсупов Р.Ю. — вед. инженер НИЛ-41. E-mail: vvz@ssau.ru.

Черников Д.Г. — канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НИЛ-41, ассистент кафедры ОМД СГАУ. E-mail: 4ernikov82@mail.ru, omd@ssau.ru.

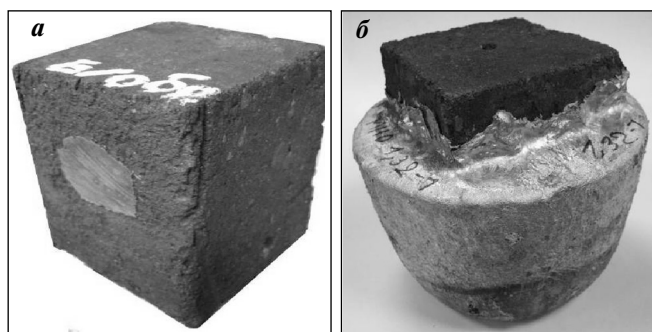


Рис. 1. Образец ЭКП (а) и углеграфитовый блок с пробкой и металлической облицовкой (б)

талл—неметалл», определяемому в основном границей раздела.

Цель настоящей работы состояла в комплексном исследовании качества границы раздела «металл ЭКП — углеродный блок».

Методика экспериментов

Для проведения исследований по оценке качества границы раздела «металл — неметалл» получены образцы [1] углеграфитовых блоков, облицованные металлом (сплав АК9ч) после магнитно-импульсного воздействия и имеющие внутри металлические электроконтактные пробки (рис. 1). Блоки выполнены из угольно-коксового материала марки ИФУ

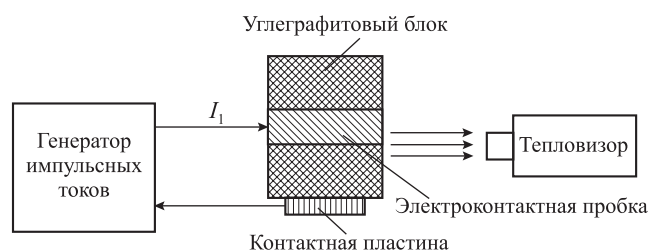


Рис. 2. Схема тепловизионного контроля контактного соединения

(производства ООО «Энергопром-ЧЭЗ», г. Челябинск), материал ЭКП и облицовки — сплав АК9ч.

Косвенная оценка качества соединения «углеблок—ЭКП»

Качество переходного соединения можно оценить по температуре, выделяемой в местах переходного сопротивления, т.е. в зоне токоподвода, при прохождении тока. Картина распределения температурных полей регистрировалась инфракрасным тепловизором «Flir-A20M» («FLIR Systems Inc., США) на поверхности углеблока в контактной зоне. Схема контроля температуры в зоне контактного соединения показана на рис. 2.

Испытанию подвергались углеграфитовые блоки с ЭКП, на которые подавались мощные импульсные

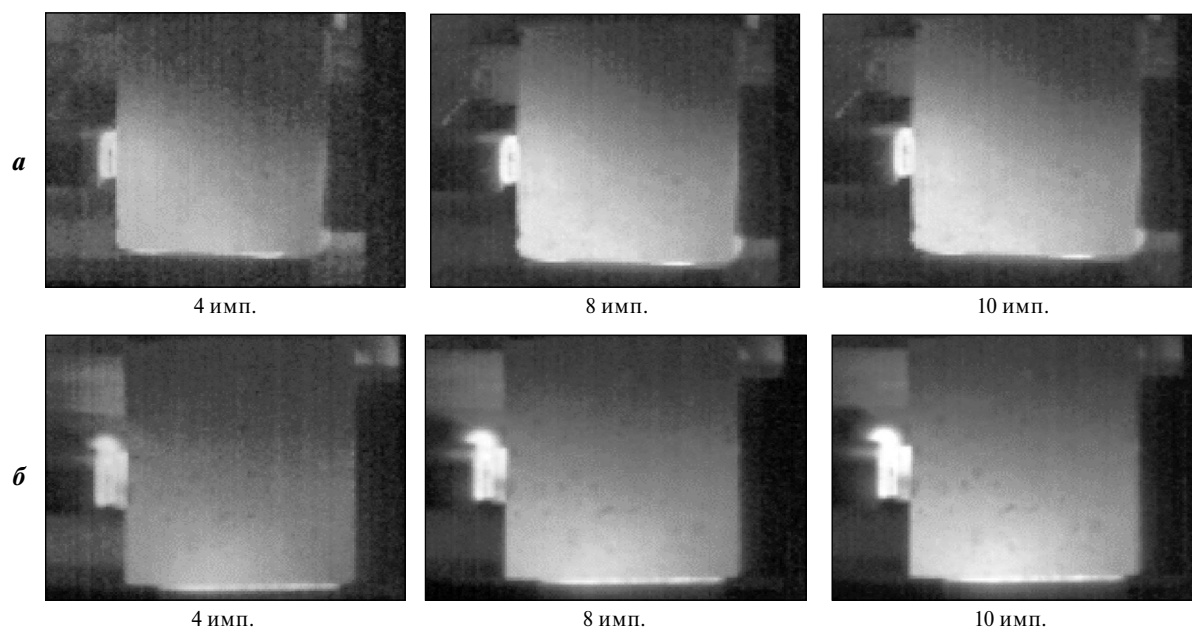


Рис. 3. Картина распределения температурных полей образцов с ЭКП при пропускании импульсного тока через контактный узел «металл—углеграфит»

а — нагрев образца без обработки ИМП, б — с воздействием ИМП энергией 1,3 кДж

токи от магнитно-импульсной установки [8] МИУ-50. У одних образцов пробки образовались под действием импульсных магнитных полей, у других — заливкой расплава без обработки ИМП.

На рис. 3 приведены температурные поля, возникающие в соединении «металл—углеграфит», для обоих случаев после пропускания серии из 10 импульсов тока с амплитудой 50 кА, длительностью 500 мкс и интервалом между ними 2 с.

Из представленных данных видно, что температура на поверхности образца без обработки в зоне контактного узла достигает 40 °С и температурное поле неравномерно, а в случае воздействия ИМП она значительно ниже и температурное поле распределено более равномерно по сечению, что указывает на меньшее значение переходного сопротивления по всей длине электроконтактной пробки, а это говорит о более качественной границе раздела «металл—углеграфит».

Методика количественной оценки переходного сопротивления «металл—неметалл»

Для количественного определения малых переходных сопротивлений электрических контактов используют приборы, реализующие четырехпроводную электросхему измерения [9] (рис. 4) на основе метода ампервольтметра. Он заключается в пропускании тока через исследуемый образец и измерении падения напряжения на контактном соединении.

Для использования приведенной схемы была осуществлена доработка полученных моделей углеграфитового электрода: в металлических пробках выполнены резьбовые отверстия для подключения с одной стороны измерительной цепи, а с другой — силовой (токовой) (рис. 5).

В ходе испытаний силовой ток величиной до 300 А, который измеряется амперметром М1, подается к основным электродам блока. Измерительные

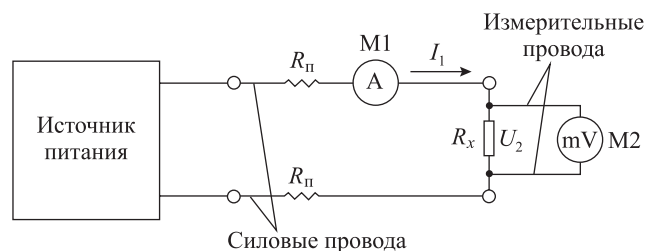


Рис. 4. Четырехпроводная схема измерения малых сопротивлений

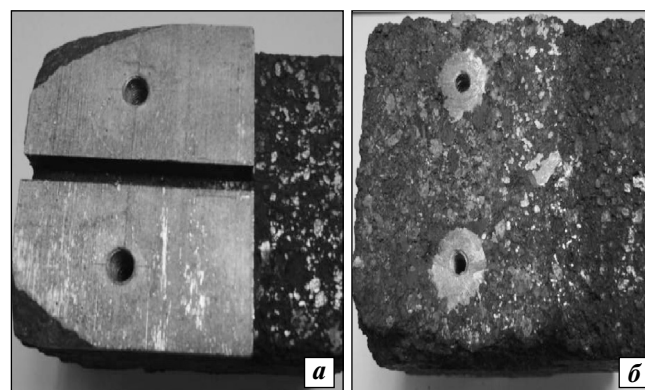


Рис. 5. Внешний вид образца углеграфитового блока с двумя ЭКП

а — вид электродов со стороны токовых клемм,
б — вид электродов со стороны измерительных клемм

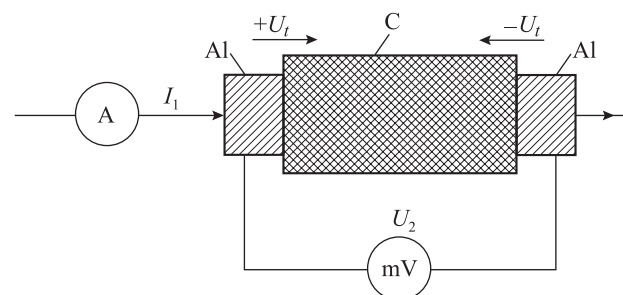


Рис. 6. Компенсация термоЭДС при измерении двумя токовыми электродами

провода к милливольтметру М2 подключаются с противоположной стороны ЭКП для исключения погрешности от сопротивления питающих проводов (R_n) и подводящих контактных соединений. Переходное сопротивление определяется по выражению $R_x = U_2/I_1$.

Для повышения точности оценки малых переходных сопротивлений применяется также компенсационный метод двойного моста [9]. Измерения производили непосредственно одно за другим при двух противоположно направленных и одинаковых по значению измерительных токах. Величина рабочих токов составляла 15—20 % от эксплуатационного.

Отметим, что возникающая в зоне контакта разнородных материалов термоЭДС (U_t), которая может достигать 10—50 мВ, вызывает дополнительную погрешность до 10 % при измерении малых сопротивлений. Для исключения ее влияния применена схема компенсации термоЭДС, показанная на рис. 6.

ТермоЭДС на границе раздела «алюминий—углеграфит» двух контактных пробок, расположенных

в цепи протекания силового тока в образце, имеет разную полярность, направлена навстречу друг другу и взаимно компенсируется.

В процессе измерения переходного сопротивления выполнялся также динамометрический контроль усилия прижима электродов к образцу и обеспечивалось его постоянство при различных испытаниях. Образец с ЭКП через изолирующие прокладки из стеклотекстолита монтировался последовательно с динамометром в зажимном блоке. Усилие прижима ЭКП к углеграфитовому блоку обеспечивалось на уровне 0,29 кН. Количество измерений на каждом образце составляло не менее 5 с интервалом для гарантированного охлаждения контактного соединения.

Общая среднеквадратическая погрешность измерения переходного сопротивления состоит из погрешностей: амперметра (< 2 %), милливольтметра (2 %), изменения сопротивления образца при нагреве тестовым током (3 %) и не скомпенсированной термоЭДС (2 %), т.е.

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_A^2 + \delta_{mV}^2 + \delta_t^2 + \delta_{U_t}^2} \approx 5 \, \%.$$

Результаты измерения переходного электросопротивления

Определение переходного сопротивления по описанной методике проводилось в сертифицированном ФГУ «Самарский центр стандартизации, метрологии и сертификации» [10] на экспериментальном измерительном стенде с помощью стандартного двойного моста. Результаты измерений и средние значения R_x приведены в таблице при различной энергии магнитно-импульсного воздействия на расплав: $W = 0,66, 1,0$ и $1,32$ кДж.

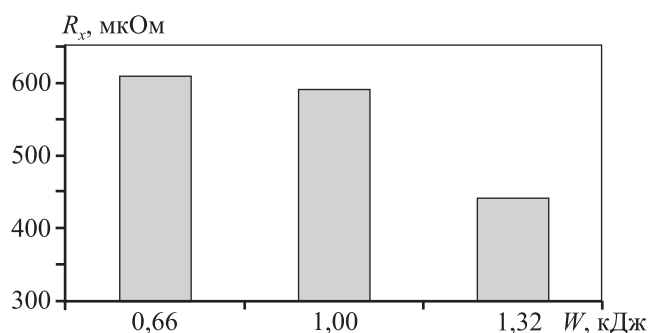


Рис. 7. Зависимость переходного сопротивления образца от энергии разряда при воздействии ИМП на расплав. Режим испытательного тока $I_1 = 100$ А

Результаты измерения переходного сопротивления образцов

Испытательный ток I_1 , А	Переходное сопротивление, мкОм			
	Без обработки ИМП	W , кДж		
		0,66	1,00	1,32
20	26900	610,0	591,7	444,0
30	30000	609,0	590,7	442,1
40	31100	608,0	590,0	441,5
50	26500	607,8	589,7	441,0
60	24300	607,6	589,4	440,0
70	21600	607,4	589,1	440,5
80	18400	607,1	589,0	440,5
90	16600	607,1	589,4	440,2
100	15500	607,0	589,3	440,1
120	14000	607,0	589,2	439,9
140	12000	606,8	589,3	439,7
160	—	606,7	589,5	439,4
180	—	606,8	589,9	438,7
200	—	606,8	590,4	438,4
300	—	606,7	591,1	435,3

На рис. 7 представлена зависимость переходного сопротивления образцов от величины энергии разряда при воздействии ИМП на расплав металла при формировании ЭКП.

По результатам измерений установлено, что переходное сопротивление образца с заливкой без воздействия ИМП почти на 2 порядка превышает соответствующие значения R_x образцов с обработкой расплава.

Металлографические исследования границы раздела «металл—неметалл»

Для выявления причин столь значительного снижения переходного сопротивления были выполнены металлографические исследования границы раздела «металл ЭКП — углеродный блок».

Образцы для экспериментов вырезались на границе раздела «металл—неметалл» и заливались сплавом Вуда, что препятствовало разрушению границы при механических нагрузках в процессе пригото-

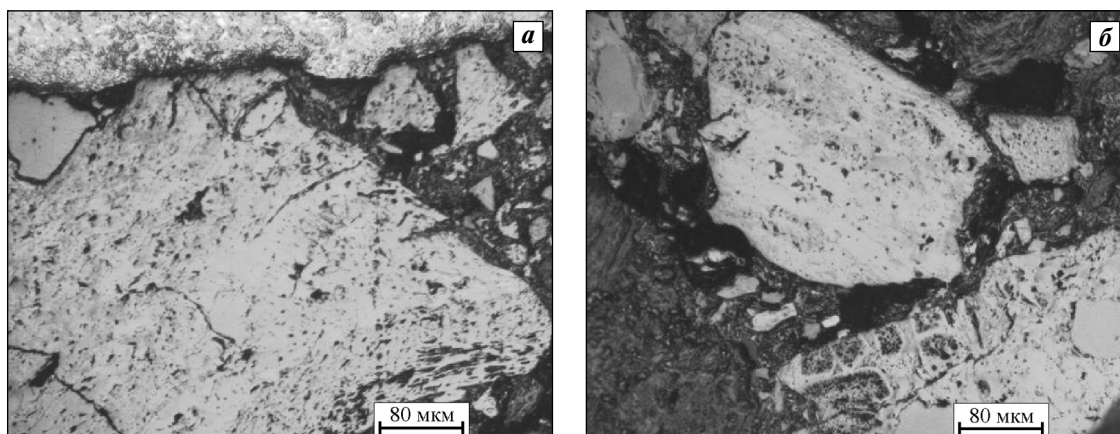


Рис. 8. Микроструктура образца без воздействия ИМП на расплав вблизи границы раздела «металл ЭКП – углеродный блок» (а) и на расстоянии 1 мм от нее (б) ($\times 125$)
Включения алюминия в углеграфите отсутствуют

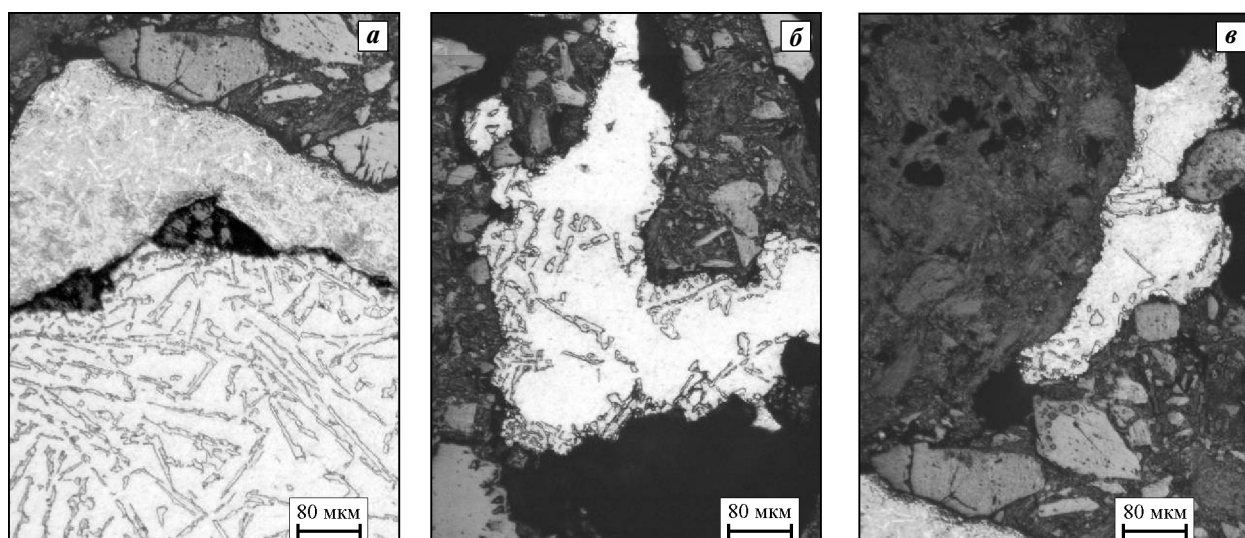


Рис. 9. Микроструктура образца после воздействия ИМП ($W = 0,66$ кДж) на расплав вблизи границы раздела «металл ЭКП – углеродный блок» (а), на расстоянии от нее 1 мм (б) и 2 мм (в) ($\times 125$)
Видны включения алюминия в углеграфита на расстоянии 1–2 мм

ления микрошлифа. Полученные в ходе металлографического анализа микроструктуры представлены на рис. 8 и 9.

По результатам изучения нескольких партий образцов выявлено следующее: без воздействия на расплав ИМП проникновения алюминия в углеграфит не происходит, а в случае применения магнитно-импульсной обработки в материале обнаружены включения Al на расстоянии 1–2 мм от границы раздела. Этот факт и может объяснить снижение электросопротивления для обработанных ИМП образцов. Расширение площади контакта достигается за счет проникновения расплава в поры углеродного блока.

Оценка адгезионной прочности соединения «металл–неметалл»

Методы измерения данного параметра основаны на определении приложенного внешнего усилия, под действием которого в контактном соединении возникают нормальные и тангенциальные напряжения, приводящие к его разрушению.

В проводимых исследованиях адгезионная прочность соединения измерялась по усилию отрыва металлической части образца от углеродного материала. Для экспериментов были использованы образцы с электроконтактными пробками (как с воздействием ИМП, так и без него), на которых меха-

нической обработкой была срезана металлическая облицовка со всех сторон, кроме одной. К боковым граням облицовки и выступающим поверхностям ЭКП резьбовыми креплениями присоединялась специальная оснастка для установки в зажимы испытательного оборудования. Для проведения испытаний использовалась универсальная испытательная машина TestometricFS 150AX («Testometric Company Ltd.», Великобритания).

При приложении нагрузки облицовка от образцов, полученных без воздействия ИМП, отделилась сразу. Величина усилия отрыва в данном случае была настолько малой, что ее даже не удалось зафиксировать. В случае образцов, обработанных ИМП при энергии разряда 0,66 кДж, наибольшее усилие отрыва металлической части ЭКП от углеродной составило 1,65 кН. Полученные результаты говорят о существовании оптимального интервала воздействия ИМП на расплав, при котором обеспечиваются наилучшие показатели механических и технологических параметров литого металла, в том числе жидкотекучести и адгезионных свойств.

Заключение

Анализ микроструктур образцов показал, что воздействие ИМП способствует заполнению расплавом микротрещин углеграфитового блока. При рассматриваемых энергиях разряда глубина проникновения расплава в углеграфитовый блок составляет более 2 мм, что значительно увеличивает

реальную площадь контакта. Это явление повышает адгезионную прочность соединения «металл ЭКП — углеродный блок» и в конечном счете значительно (на порядок) снижает переходное сопротивление.

Литература

1. Глушников В.А., Гречников Ф.В., Лазарева А.А., Черников Д.Г. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2012. № 1. С. 20—24.
2. Пат. 2385976 (РФ). Способ образования литых электроконтактных пробок / В.А. Глушников, В.А. Лебедев, Д.Г. Черников и др. Заявл. 08.07.2008. Оpubл. 10.04.2010.
3. Глушников В.А., Гречников Ф.В., Никитин В.И. и др. // Литейщик России. 2010. № 7. С. 34—39.
4. Патон Б.Е., Лакомский В.И., Лебедев В.А. // Цв. металлы. 2004. № 6. С. 90—93.
5. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977.
6. Psyk V., Risch D., Kinsey Brad, Tekkaya A.E., Kleiner M. // J. Mater. Proces. Technol. 2011. Vol. 211, № 5. P. 787—829.
7. Чугунный Е.Г. // Литейное пр-во. 1996. №1. С. 12—13.
8. Талалаев А.К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов. М.: НТЦ «Информтехника», 1992.
9. Попов В.С. Электротехнические измерения и приборы. М.: Госэнергоиздат, 1956.
10. <http://www.samaragost.ru/>