

УДК 669.117.56

## ПОДОВЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. А. Зайцев, Л. Б. Медовар

Приведены основные виды подовых электродов-анодов дуговых печей постоянного тока, применяемых в настоящее время, их конструкции и эксплуатационные характеристики. Описан способ электрошлакового переплава со сменой стального и медного расходоуемых электродов, рассмотрено качество биметаллического сталемедного слитка — заготовки анода.

Main types of hearth electrodes-anodes of DC arc furnaces, used at present, their design and service characteristics are given. Method of electroslag remelting with a change of steel and copper consumable electrodes is described and quality of bimetal steel-copper ingot-anode billet is considered.

**Ключевые слова:** дуговая электропечь постоянного тока; подовый электрод-анод; биметалл; электрошлаковый переплав

Несмотря на очередной спад в мировой экономике совершенствование предприятий черной металлургии продолжается [1]. Появление новых агрегатов и технологий характерно практически для всех переделов. Одним из заметных явлений последних лет стало широкое применение с одновременным увеличением единичной мощности дуговых печей постоянного тока (ДППТ) [2]. Основными производителями ДППТ вместимостью до 200 т являются такие предприятия, как «Danieli» (Италия), «VAI Fuchs GmbH» (Германия), «ЭКТА» (Москва, Россия), «МТФ» (Набережные Челны, Россия), «УкрНИИЭлектротерм» и «Струмтех ЛТД» (Запорожье, Украина). Сообщается о строительстве фирмой «Danieli» на заводе «Токуо Steel» (Япония) самой мощной в мире 420-тонной дуговой печи постоянного тока, рассчитанной на ежегодный выпуск 2,6 млн т стали [3].

Дуговые электропечи постоянного тока имеют ряд преимуществ, по сравнению с традиционными ДСП переменного тока. Применение ДППТ позволяет сократить расход электродов в 2... 5 раз (в зависимости от подготовки шихты); электроэнергии на 10... 15 %; огнеупорных материалов на 20... 30 %; исходного сырья на 1,5... 2,0 %; дорогостоящих легирующих добавок на 20... 60 %. Кроме того, снижается уровень шума (примерно от 105 до 85 дБ) и уменьшается количество пылегазовыбросов в 8... 10

раз (от 52,5 до 6,3 кг/ч, при сравнении с 25-тонной дуговой печью переменного тока и ДППТ [2]).

В результате резкого (в 2... 5 раз) снижения фликкер-эффекта повышается ресурс печных трансформаторов, гибких кабелей, короткой сети и электрододержателей. Дуговые электропечи постоянного тока характеризуются более высоким энергетическим КПД, низким процентом угара металла и (что не менее важно) лучшими условиями труда. ДППТ могут работать с полным и частичным сливом металла, а также в качестве миксера. Вследствие возможности использовать электрохимические реакции на постоянном токе для удаления вредных примесей, улучшения перемешивания металла и более высокой стабильности процесса в этих агрегатах повышается качество выплавляемого металла [4].

Отличительными особенностями конструкции дуговой печи постоянного тока являются центрально расположенный электрод (катод) и подовый электрод-анод (один или несколько), смонтированный в днище кожуха. Кроме всего прочего, ДППТ отличаются конструктивным исполнением подового электрода [5].

Подовый электрод, размещаемый в подине печи, является одним из основных ее элементов. Он служит для подвода тока к шихте и переплавляемому металлу. Конструкция подового электрода должна обеспечивать надежность электрического контакта с шихтой при минимальных тепловых потерях, эффективность охлаждения электрода, простоту и технологичность его изготовления. Материал электро-

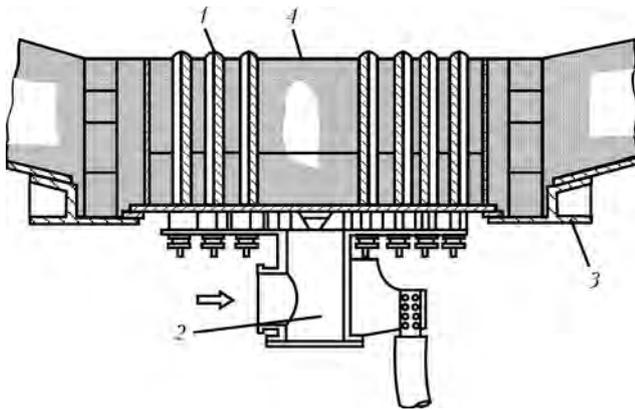


Рис. 1. Типичная схема подового электрода многоштыревого типа: 1 – контактные штыри; 2 – узел воздушного охлаждения; 3 – днище печи; 4 – огнеупорная футеровка

да необходимо выбирать с учетом надежной работы при высоких тепловых и токовых нагрузках, стойкости к механическим и тепловым ударам, чистоты расплава и отсутствия его взаимодействия с футеровкой подины. Электрод должен обеспечивать бесперебойную работу подины [6, 7], поскольку выход его из строя приводит к длительным простоям из-за необходимости замены подины и самого подового электрода.

Основными причинами, вызывающими разрушение подового электрода, являются следующие:

- размывание футеровки вокруг него;
- перегрев расплава;

джоулево тепло от тока, протекающего по электроду и расплаву;

- физико-химическое взаимодействие расплава с материалом электрода;

микродуги между шихтой и рабочим торцом электрода;

наличие в ванне интенсивных потоков расплавленного металла, вызываемых действием электромагнитных сил и т. д.

Таким образом, указанные обстоятельства определяют основное требование к конструкции подовых электродов – высокую стойкость при хорошем электрическом контакте.

В промышленных дуговых электропечах постоянного тока применяют подовые электроды трех основных конструктивных типов: многоштыревого, пластинчатого (токоподводящая подина печи) и

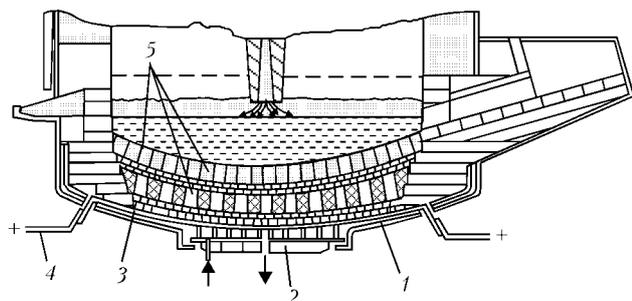


Рис. 2. Типичная схема подового электрода пластинчатого типа: 1 – днище печи; 2 – система охлаждения подового электрода; 3 – вкладыш из меди; 4 – токоподвод; 5 – подовый электрод пластинчатого типа

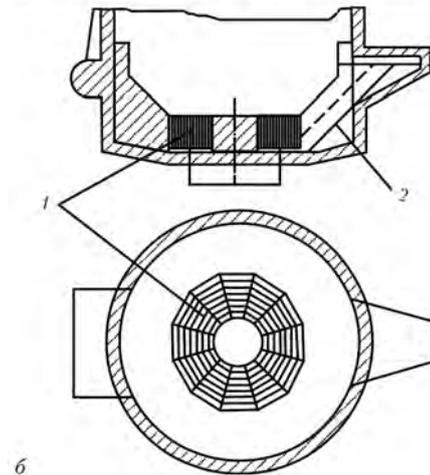
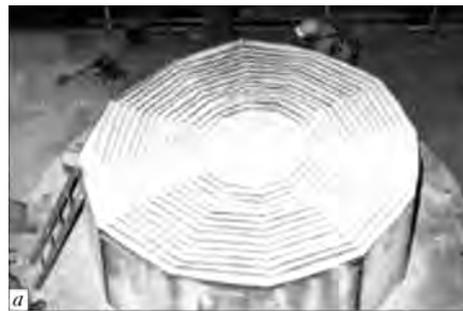


Рис. 3. Подовый электрод конструкции фирмы «VAI Fuchs»: а – внешний вид; б – схема; 1 – многоштыревой электрод; 2 – футеровка печи

стержневого [7]. Электроды многоштыревого (рис. 1) и пластинчатого (рис. 2) типов являются слабым местом конструкции ДППТ, так как по различным причинам их стойкость, согласно данным работ [8, 9], составляет всего 300...700 плавов, и из-за этого все они получили незначительное распространение, за исключением подового электрода многоштыревого типа фирмы VAI-Fuchs (рис. 3).

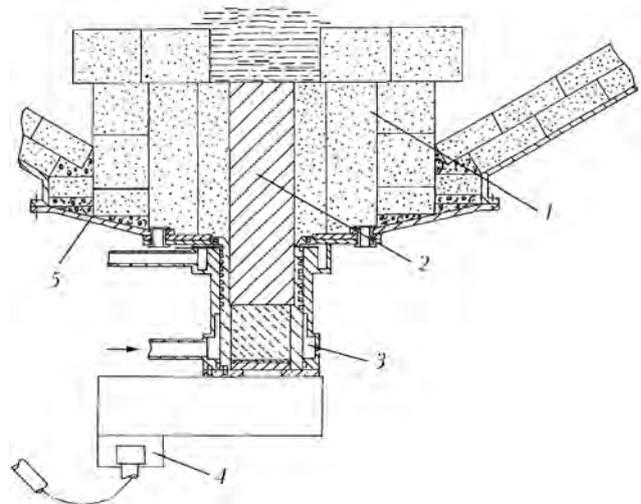


Рис. 4. Типичная схема подового электрода стержневого типа: 1 – огнеупорная футеровка печи; 2 – подовый электрод; 3 – узел водяного охлаждения; 4 – токоподвод; 5 – днище печи



Этот электрод представляет собой тонкие стальные пластины, внутри утрамбованные магнезитовой массой. Они вертикально приварены к горизонтальной плите кольцеобразной формы, установленной на поду печи. Благоприятное соотношение толщины и поверхности листов исключает необходимость в водоохлаждении, что позволяет повысить работоспособность и безопасность. Конструкция электрода способствует плавной и равномерной передаче электрического тока через расплав к пластинам и далее к стальным листам, а также элементам короткой сети. Электроды этого типа работают без ремонта до 2000 ч.

Наибольшее применение в агрегатах ДППТ на территории СНГ и за его пределами получили подовые электроды стержневого типа (рис. 4). Особенно распространены аноды, выполненные составными в виде медного водоохлаждаемого стержня, к которому со стороны переплавляемого металла прикреплена способом сварки или другими стальная головка, контактирующая с расплавленным металлом.

Из зарубежных производителей таких электродов (как и самих агрегатов ДППТ) следует выделить итальянскую фирму «Danieli», в 1996 г. разработавшую и оснастившую свои агрегаты ДППТ подовым электродом стержневого типа (рис. 5).

Подовый электрод состоит из следующих частей: стальной 1 и охлаждаемой 2, соединяющей стальную и медную; нижней трубчатой медной 3 и футерованной огнеупорным материалом 4. Последняя расположена в нижней части головки медного электрода и имеет спиралевидные каналы для воды. Внешняя поверхность покрыта керамическим материалом для предупреждения прорыва металла в

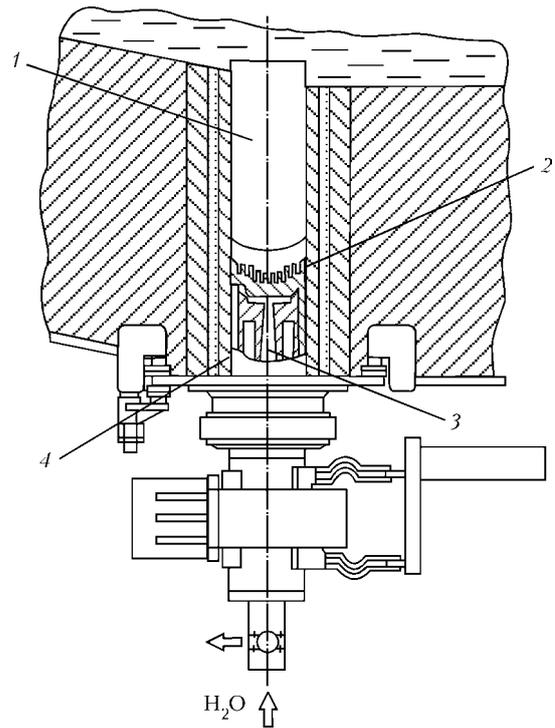


Рис. 5. Подовый электрод дуговой сталеплавильной печи постоянного тока конструкции фирмы «Danieli» [10]; обозн. см. в тексте

электрод. Стальная и медная части соединены способом алюмотермической сварки. В процессе работы стальная часть электрода частично расплавляется под действием теплоты жидкого металла и джоулевого тепла, выделяемых при прохождении тока.

Электроды фирмы «Danieli» успешно эксплуатируют в одно- и двухэлектродных дуговых печах

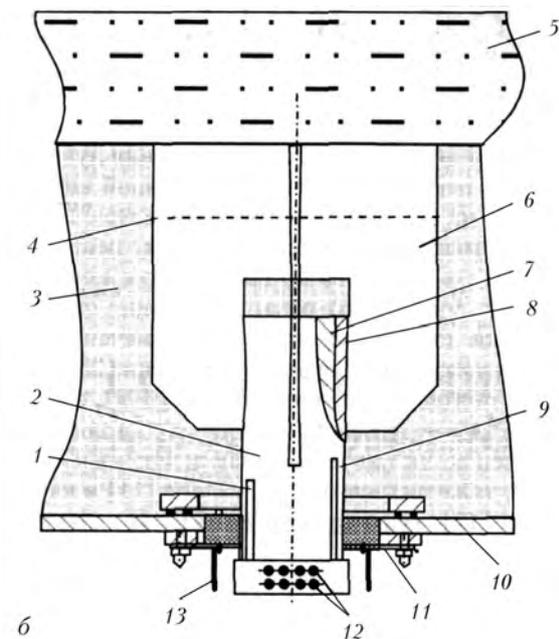


Рис. 6. Подовый электрод дуговой электропечи постоянного тока [12, 13]\*: а – внешний вид; б – схема; 1 – датчик температуры; 2 – подовый электрод; 3 – футеровка; 4 – линия резки листов при замене подины; 5 – расплав; 6 – стальные листы; 7 – медь; 8 – сталь; 9 – датчик температуры; 10 – днище печи; 11 – изолятор; 12 – каналы водоохлаждения; 13 – прибор для контроля изоляции

\* Конструкция НТФ «Экта»(г. Москва, Россия).



Рис. 7. Заготовка подового электрода, состоящая из стальной трубы, заполненной способом ЭШП медью

ДППТ, работающих на ломе, металлизированном сырье и их смесях, а также установлены в 70-тонной печи фирмы «Balbao» (Испания), 135-тонной двухкатодной печи и 135-тонной шахтной печи фирмы «Hysa Planos» (Мексика), 90-тонной печи фирмы «ABC Danarc Plus» (Италия). Расстояние от воды до жидкой стали в этих печах составляет от 100 до 180 мм. Использование указанных подовых электродов позволило сократить затраты производства на огнеупоры, улучшить перемешивание ванны путем оптимизации размещения анодов в подине печи. Стойкость их составляет 2000... 5300 плавок [11].

На территории России в печах ДППТ применяют подовые электроды, внешний вид и схема которых представлены на рис. 6 [12, 13].

Подовый электрод представляет собой стальные листы, проходящие через подину печи. Стальные

листы приварены к базе подового электрода, состоящей из стальной трубы, внутренняя часть которой способом ЭШП заполнена медью (рис. 7).

Под корпусом печи выполнены каналы охлаждения. Внутри базы размещены датчики контроля температуры. Конструкция взрывобезопасна, поскольку каналы охлаждения вынесены за пределы печи, а состояние подового электрода непрерывно контролируют. Надежный контакт меди и стали обеспечивают способом электрошлакового литья. При замене футеровки стальную часть подового электрода обрезают и приваривают новую.

Сварку между стальными листами и базой легко осуществить, поскольку они выполнены из однородного материала. Подовые электроды описанной конструкции безаварийно работают от 2 до 5 лет на агрегатах ОАО «Курганмашзавод» (две шеститонные ДППТ), ОАО «Тяжпрессмаш» (емкость печи 22... 30 т), ПО «Ижсталь» (30-тонная печь), ОАО «Электросталь» (шеститонная печь), ОАО «ГАЗ» (12-тонная печь), ОАО «Костромамотордеталь» (две печи емкостью по 3 т каждая), ОАО «Ступинская металлургическая компания» (печь емкостью 0,5 т), ОАО «Дорогобушкотломаш» (1,5-тонная печь) и других предприятий России.

На территории Украины в агрегатах ДППТ применяют стержневые водоохлаждаемые сталемедные подовые электроды (рис. 8)\*.

Стальная верхняя часть такого электрода контактирует с жидким металлом и в процессе работы частично оплавляется, а медная нижняя располагается ниже плавильной зоны и охлаждается водой.

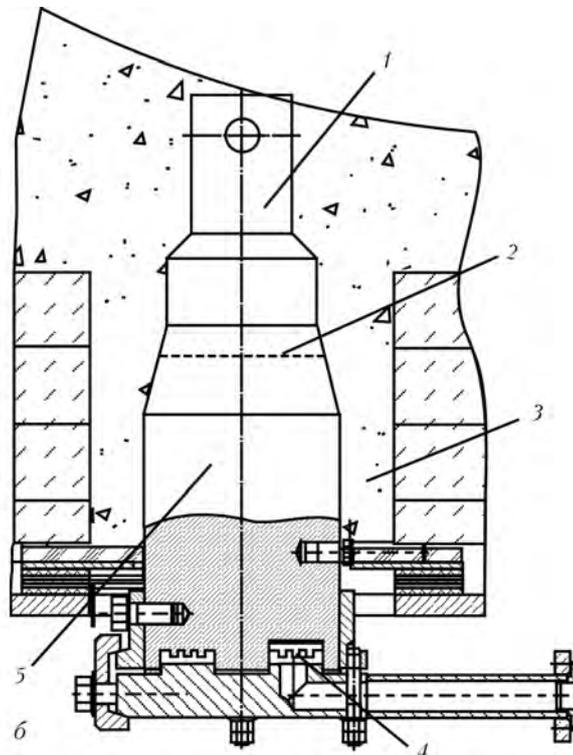


Рис. 8. Сталемедный подовый электрод: *a* — внешний вид; *b* — схема; 1 — стальная часть электрода; 2 — зона соединения стали с медью; 3 — футеровка печи; 4 — каналы водоохлаждения; 5 — медная часть электрода

\* Конструкция ЧП «Роуд» (г. Донецк, Украина).

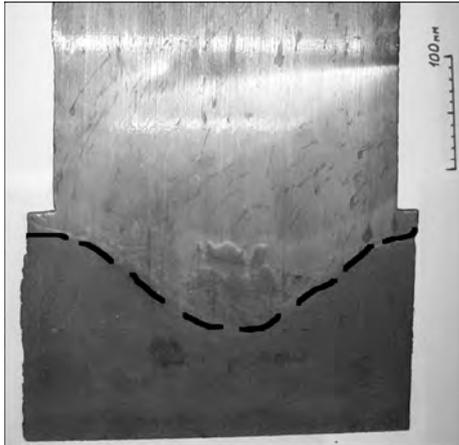


Рис. 9. Продольный макротемплет сталемедного слитка (штриховая линия проведена по переходной зоне сталь-медь)

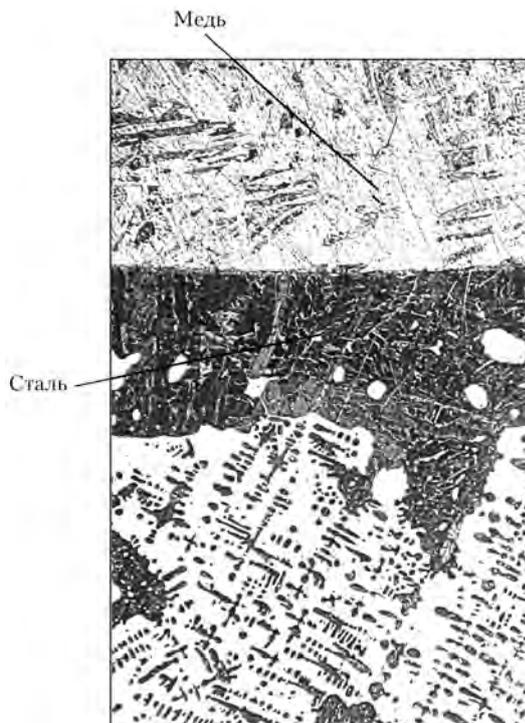


Рис. 10. Микроструктура (X50) переходной сталемедной зоны

Для контроля температуры медной части электрода используют два термоэлектрических преобразователя. С их помощью температуру воды поддерживают на уровне не выше 80 °С, поскольку при более высокой температуре обнаружено выпадение на рабочей поверхности каналов охлаждения солей жесткости, что снижает теплоотдачу от медной части к воде и является недопустимым.

Ранее такие подовые электроды получали из отдельно прокатанных стальных и медных заготовок, в последующем соединенных между собой способом ручной сварки и прошедших механическую обработку до чистового размера. Такая технология про-



Рис. 11. Заготовки сталемедных подовых электродов

изводства данных электродов весьма затруднительна из-за проблем сварки стали и меди больших сечений.

Для изготовления заготовок анодов указанной конструкции создана технология ЭШП. Применение электрошлаковых технологий весьма эффективно при производстве различных биметаллов [14]. Поэтому нами предпринята попытка использовать недавно разработанную технологию ЭШП дуговой сварки (ДС) со сменой электродов по ходу плавки для получения сталемедных заготовок подовых электродов [15, 16].

Создатели данной конструкции подового электрода поставили перед собой задачу уменьшить протяженность переходной зоны между стальной и медной частями. С этой целью проведены работы\* по выплавке сталемедных слитков диаметром 350 мм с различным распределением мощности между расходующим и нерасходующим электродами (токоведущим кристаллизатором) при ЭШП ДС. На рис. 9 представлен продольный макротемплет заготовки электрода с оптимальным (по результатам применения в реальных ДППТ) профилем переходной зоны от стали к меди.

На рис. 10 приведена типичная микроструктура переходной зоны, а на рис. 11 — внешний вид сталемедных слитков после проточки.

Подовыми электродами описанной конструкции оснащены агрегаты таких предприятий, как ЗАО «Ферротрейдинг», Запорожье (12-тонная печь); ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог» (агрегаты вместимостью 0,5; 3 и 6 т); ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат» (вместимость печи 12 т); ОАО «Завод Днепропресс», г. Днепропетровск и других. Их промышленная эксплуатация продолжается без замены уже более 4 лет.

1. [http://www.expert.ru/printissues/expert/2009/11/new\\_spad\\_priost-anovilsya](http://www.expert.ru/printissues/expert/2009/11/new_spad_priost-anovilsya).
2. *Малиновский В. С., Ярных Л. В.* Дуговые печи постоянного тока нового поколения — новый путь эффективной реконструкции металлургического машиностроения России // Металлургия машиностроения. — 2001. — № 1. — С. 12–19.

\* В работах принимали участие сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона Б. Б. Федоровский, В. Я. Саенко, А. К. Цыкуленко, В. И. Ус, В. Б. Смолярко, В. Л. Петренко, Н. Т. Шевченко, В. А. Рябинин, Р. В. Козин, В. М. Журавель, В. В. Жуков, В. М. Ярош, а также сотрудники ЧП «Роуд» П. И. Тищенко, А. П. Тищенко.



3. *Сойфер В. М.* Новые проекты ДСП фирмы Даниэли // *Электрометаллургия*. — 2008. — № 4. — С. 46–48.
4. *Пути* улучшения показателей выплавки стали в малотоннажных дуговых печах / С. М. Немахин, М. М. Крутянский, А. Я. Стомахин и др. // Там же. — 2007. — № 7. — С. 2–7.
5. *Филитов А. К., Крутянский М. М., Фарнасов Г. А.* Использование электропечей постоянного тока в металлургии // *Сталь*. — 2002. — № 1. — С. 33–37.
6. <http://www.toledo.ru/part3/Premier-pech>.
7. *Сазонов В., Смирнов А.* Печной типаж // *Металл*. — 2004. — № 10. — С. 35.
8. *Каплун М. Я., Кобря Н. В.* Подовые электроды плавильных печей // *Электротехн. пром-ть. Сер. Электротермия*. — 1983. — Вып. 4. — С. 9–10.
9. *Каплун М. Я., Кобря Н. В.* Подовые электроды плавильных печей // Там же. — 1983. — Вып. 6. — С. 27–29.
10. *Степанова В. Ю.* Подовые электроды (короткий обзор) // *Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра: 36. наук. робіт студентів і випускників кафедри ФХОТМ*. — Київ: Політехніка, 2007. — С. 46–50.
11. *Симонян Л. М., Котельников Г. И.* // *Дуговые печи постоянного тока: настоящее и будущее* // *Сталь*. — 1994. — № 5. — С. 44.
12. *Высоконадежный* подовый электрод для дуговых сталеплавильных печей постоянного тока / Ю. И. Зиннуров, Ю. Н. Тулуевский, В. С. Лобанов и др. // *Металлург*. — 1988. — № 6. — С. 48–49.
13. *Малиновский В. С.* Энерготехнологические возможности дуговых печей постоянного тока нового поколения // *Электрометаллургия*. — 2007. — № 7. — С. 8–14.
14. *Электрошлаковая* технология в производстве биметаллических заготовок / Б. Е. Патон, В. Я. Саенко, Л. Б. Медовар и др. // *Современ. электрометаллургия*. — 2004. — № 2. — С. 8–11.
15. *Патон Б. Е.* Современные достижения ИЭС им. Е. О. Патона в области сварки и родственных процессов // Там же. — 2004. — № 2. — С. 3–18.
16. *Чернец А. В.* Новые электрошлаковые технологии с распределением плавления и затвердевания металла: Дис. ... д-ра техн. наук. / НАН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев, 2001. — 352 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 08.04.2009

## НОВАЯ КНИГА

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ:

Сб. тр. четвертой междунар. конф.

(27–30 мая 2008 г., пос. Кацивели, Крым, Украина). —

Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2009. — 181 с.



В сборнике представлены доклады четвертой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», в которых отражены достижения в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах, достигнутые в последние годы. Авторами докладов являются известные специалисты из различных стран мира.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.