

УДК 669.187.56.001.1

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КРУПНЫХ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ

**Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. П. Стовпченко,
А. К. Цыкуленко, Н. Т. Шевченко, В. М. Журавель,
А. А. Полишко, Б. Б. Федоровский, Г. В. Нощенко, В. А. Лебедь**

Обсуждены возможности применения различных электрошлаковых технологий для получения крупных кузнечных слитков. Показана перспективность двух новых электрошлаковых технологий — электрошлакового переплава по двухконтурной схеме и электрошлаковой наплавки жидким металлом для повышения качества кузнечных слитков из высоколегированных сталей и сплавов. Предложена новая концепция электрошлаковой печи для получения слитков и заготовок массой вплоть до 300 т.

Possibilities of application of different electroslag technologies for producing large forge ingots are discussed. The challenge of two new electroslag technologies: electroslag remelting using a two-circuit diagram and electroslag cladding using a liquid metal to improve the quality of forge ingots of high-alloy steels and alloys, is shown. New conception of electroslag furnace for producing ingots and billets of mass up to 300 t has been offered.

Ключевые слова: кузнечный слиток; электрошлаковый переплав; электрошлаковая наплавка жидким металлом; полый слиток; прокатный валок; электрошлаковая печь

Задача получения качественного крупного слитка из высоколегированных сталей и сплавов не имеет полного решения. С каждым витком повышения требований потребителей к свойствам толстых плит и поковок и соответственного усложнения системы легирования сталей и сплавов эта проблема обостряется, в частности при производстве некоторых видов так называемых суперсплавов на никелевой основе сегодня вынуждены применять трехступенчатую (ВИП + ЭШП + ВДП) технологию получения слитков массой всего до 20 т и диаметром около 1000 мм.

В последние годы в связи с развитием энергетики и энергетического машиностроения возобновился интерес к возможностям электрошлаковых технологий повышения качества кузнечных слитков. Так, до последнего времени в мире работали всего три печи ЭШП, обеспечивавшие получение слитка массой 100 т и выше (Shanghai Heavy Machinery — 200 т; Saarschmidte — 165 т; Japan Steel Works — 110 т).

Имеются сведения о строительстве в мире не менее семи печей ЭШП для получения слитков массой от 100 до 450 (!) т [1–3]. Есть основания пола-

гать, что в ближайшее время в энергетическом машиностроении СНГ, прежде всего России и Украины, также обострится проблема получения качественного тяжелого кузнечного слитка. В этой связи и проводятся работы по изысканию новых возможностей применения различных электрошлаковых технологий для получения качественных кузнечных слитков из жаропрочных сплавов и высоколегированных сталей, в первую очередь для энергетического машиностроения.

На рис. 1 схематически объединены по родственным технологическим признакам электрошлаковые технологии, применяющиеся для производства кузнечных слитков. Помимо разновидностей классического ЭШП, сегодня в промышленности для производства кузнечных слитков используют только электрошлаковую подпитку, позволяющую повысить плотность и уменьшить химическую неоднородность стали в осевых объемах слитка при сведении к минимуму головной обрезки. Этот процесс, усовершенствованный специалистами австрийской фирмы «Белер», получил название BEST, а итальянской фирмы «Терни» — TREST. Принципиальное различие между ними состоит в том, что в первом применяют водоохлаждаемую

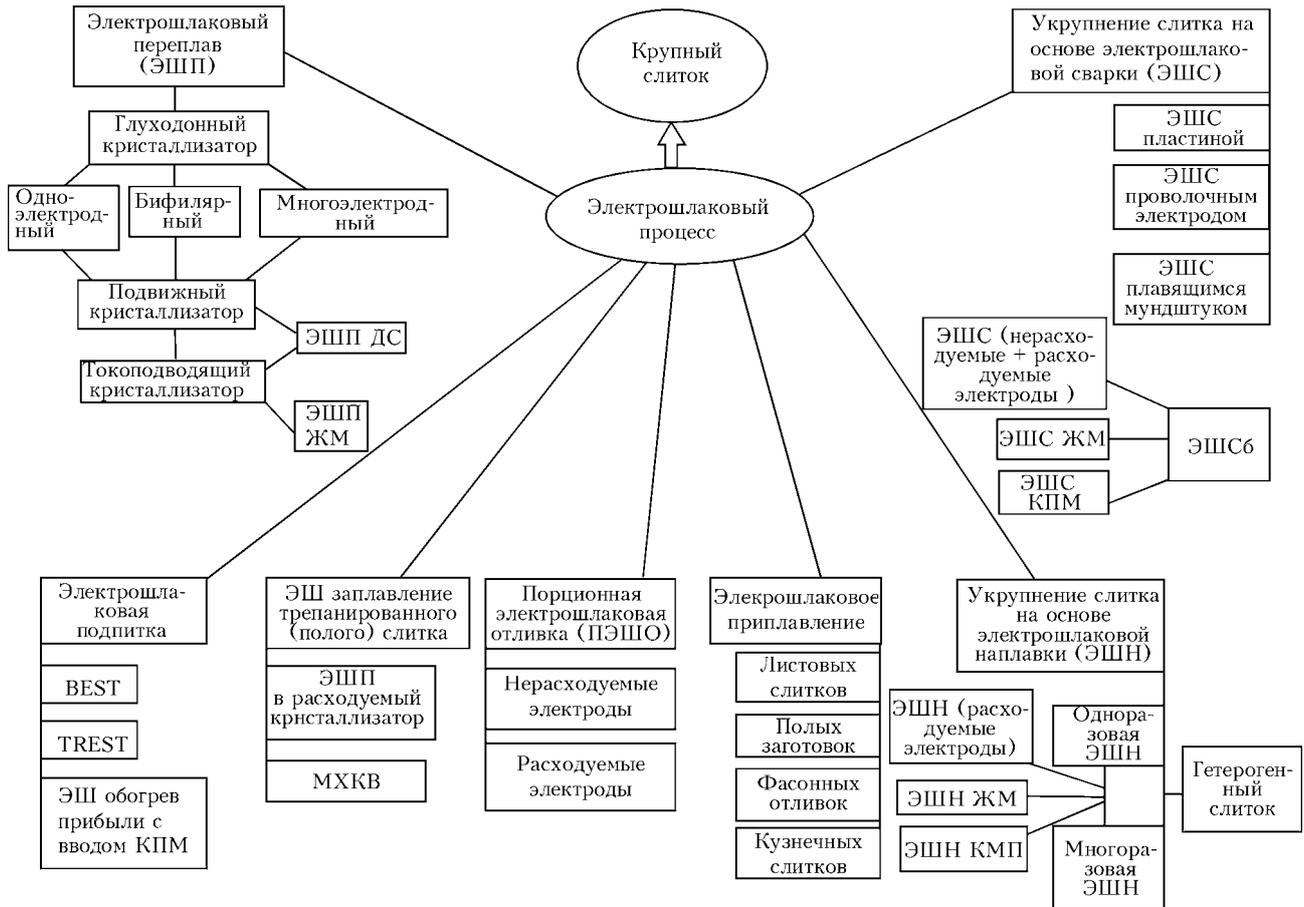


Рис. 1. Электрошлаковые технологии получения крупных слитков

надставку прибыльную, а во втором – футерованную. Авторы полагают, что наряду с этими проверенными способами серьезную перспективу имеют также технологии электрошлакового перепада по двухконтурной схеме (ЭШП ДС) и электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ).

На рис. 2 представлена принципиальная ЭШП ДС, а на рис. 3 – ЭШН ЖМ [4, 5].

При ЭШП ДС реализуется принципиальное изменение одной из главных характеристик классических перепадных процессов специальной электрометаллургии – наличие двух независимых источников питания дает возможность разорвать жесткую связь между подводимой к переплавляемому электроду мощностью и производительностью перепада. Это позволяет варьировать скорость перепада в широких пределах без потери металлургического качества слитка. Следовательно, в промышленных условиях можно бороться с сегрегационными явлениями, уменьшая скорость перепада без потери качества поверхности слитка.

На рис. 4 сравниваются макроструктуры слитков ЭШП и ЭШП ДС диаметром 500 мм, выплавленных из одинаковых электродов на одной печи ЭШП под одним и тем же шлаком типа 1/3-1/3-1/3 и при одинаковой мощности, выделяемой в шлаковой ванне. При ЭШП ДС удалось более чем вдвое, по сравнению со стандартным ЭШП, уменьшить глубину жидкоме-

таллической ванны без снижения общей мощности перепада. Этот результат достигнут при соотношении подводимой через расходоуемый электрод электрической мощности к мощности, подводимой через токоведущую секцию кристаллизатора, примерно как 65:35 общей мощности перепада (550...570 кВ·А).

При экспериментах на опытно-промышленной печи ЭШП, оснащенной двумя трансформаторами мощностью 720 кВ·А каждый, это соотношение варьировали в широких пределах, что позволяло изменять не только общую глубину жидкометаллической ванны, но и ее профиль, достигая практически ее плоской формы.

Отметим, что среди строящихся за рубежом гигантских печей ЭШП есть проекты, обеспечивающие реализацию ЭШП ДС [3].

Мы полагаем, что обнадеживающие результаты, полученные к настоящему времени при применении ЭШП ДС на опытно-промышленных слитках высоколегированных аустенитных и ледебуритных сталей, а также сплавов типа инконель 718 свидетельствуют о серьезных перспективах этой технологии ЭШП.

По-видимому, необходимость уменьшения скорости перепада для повышения качества слитка может ограничивать применение ЭШП ДС слитками сравнительно небольшой массы (возможно 50...60 т). Однако такое ограничение не очень существенно. Ве-

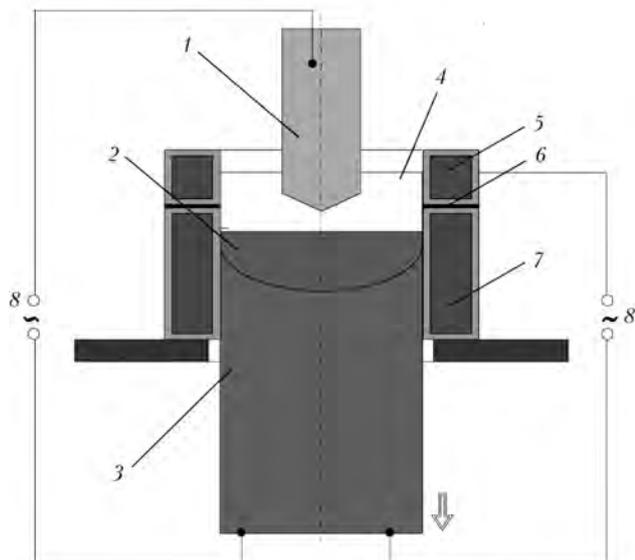


Рис. 2. Схема ЭШП ДС: 1 – расходный электрод; 2 – жидкометаллическая ванна; 3 – слиток; 4 – шлаковая ванна; 5 – токоведущая секция кристаллизатора; 6 – разделительная секция; 7 – формирующая секция кристаллизатора; 8 – источники питания

роятно, основной областью применения ЭШП ДС будет переплав жаропрочных сплавов, склонных к пятнистой ликвации. А для этих сплавов слитки пока имеют примерно вдвое меньшую массу. Более того, применение ЭШП ДС, возможно, позволит отказаться от трехступенчатого передела и ограничиться двойным, например ВИП + ЭШП ДС или АОД + ЭШП ДС.

Принципиально иной подход к повышению качества реализуется при укрупнении слитка. Попытки получить большой слиток из нескольких маленьких предпринимались в металлургии давно, в том числе за счет использования в промышленности двух электрошлаковых технологий – электрошлаковой сварки и заплавления центральной части трепанированного слитка, так называемый процесс МХКВ [6, 7].

Разрабатываемая в последнее время идея ЭШН ЖМ для получения тяжелого кузнечного слитка основана на трех принципиальных особенностях, определяющих ее серьезные перспективы [8–10]: во-первых, это электрошлаковая технология без расходных электродов; во-вторых, при ЭШН ЖМ возможно получение полых слитков; в третьих, при ЭШН ЖМ реализована возможность получения слитков переменного химического состава.

Технология ЭШН ЖМ под руководством академика Б. И. Медовара создана для производства композитных прокатных валков [11, 12]. В общем виде процесс ЭШН ЖМ происходит следующим образом. В отдельном сталеплавильном агрегате, которым может служить, например, индукционная печь или ДСП, выплавляют металл для формирования рабочего слоя валка требуемого химического состава.

Одновременно в шлакоплавильной печи выплавляют шлак типа АНФ-29, АНФ-32, АНФ-94 или другого состава. Затем жидкий шлак подают на установку и заливают в зазор между формирующей секцией токоведущего кристаллизатора и напла-

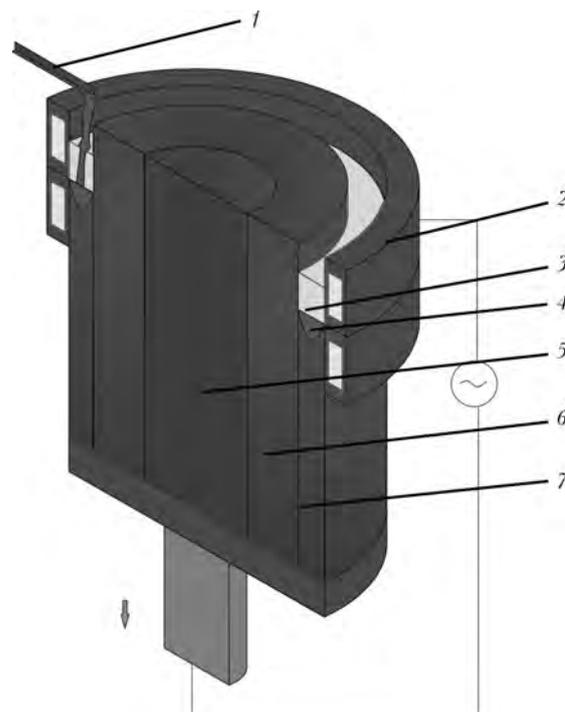


Рис. 3. Принципиальная схема ЭШН ЖМ; 1 – заливочное устройство для подачи жидкого металла в кристаллизатор; 2 – токоподводящий кристаллизатор; 3, 4 – соответственно шлаковая и металлическая ванна; 5 – центральный слиток; 6, 7 – слои металла соответственно после одно- и двукратной наплавки

ваемой заготовкой прокатного валка. Такой заготовкой может быть отработавший валок при восстановительной наплавке, литая или кованая заготовка с размерами, близкими к таковым прокатного валка при изготовительной наплавке. Данную заготовку следует предварительно обработать механически «как чисто».

Возможно также применение заготовок в литом или кованом виде без специальной обработки поверхности, но с предварительной зацентровкой. Как только жидкий шлак коснется токоведущей секции кристаллизатора, замкнется электрическая цепь источник питания – наплаваемая заготовка – жидкий шлак – токоведущий кристаллизатор – источник питания и начнется электрошлаковый процесс в шлаковой ванне. После этого можно подавать предварительно выплавленный металл. В промышленных условиях в качестве заливочного устройства могут использоваться индукционные печи специальной конструкции, например индукционная, дозирующая порции металла наклоном, либо индукционная канального типа и др.

Жидкий металл, заливаемый в кристаллизатор, не должен касаться токоведущей секции, ибо это приводит к короткому замыканию. Поэтому система управления процессом учитывает, контролирует и управляет не только электрическими и массо-геометрическими параметрами процесса и наплаваемой заготовки во времени, но и постоянно корректирует уровень границы раздела шлак–металл. Для этого применяют специальный индуктивный датчик уровня, измеряющий разницу электрических параметров шлака и металла.

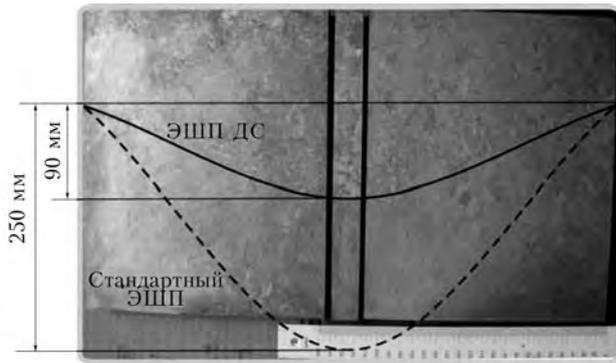


Рис. 4. Глубина металлической ванны в слитке ЭШП и ЭШП ДС диаметром 500 мм

При повышении указанного уровня по сигналу датчика подается команда на вытяжку наплавляемой заготовки из кристаллизатора, а при понижении уровня до определяемого технологией минимума — команда на заливку очередной порции наплавляемого металла.

Принципиально важно, что применение в качестве нерасходуемого электрода собственно кристаллизатора позволяет максимально «симметризовать» токоподвод к шлаку и в результате избежать проблем с неравномерным проплавлением наплавляемой заготовки. На практике проплавление контролируется с точностью до 5 мм.

При ЭШН ЖМ могут применяться различные сочетания материалов наплавки. Наплавляемый металл может быть более или менее тугоплавким по сравнению с осью, на которую осуществляют наплавку, или иметь ту же температуру плавления. Для производства валков это означает, что в качестве оси могут быть использованы и чугуны, и стали, а также отработавшие валки.

Технология ЭШН ЖМ реализована на Новокраматорском машиностроительном заводе, где работают две специализированные установки, позволяющие наплавлять заготовки рабочих и опорных валков непрерывных широкополосных станов диаметром более 1500 мм и массой практически до 50 т (рис. 5).



Рис. 5. Установка ЭШН ЖМ на Новокраматорском машиностроительном заводе

Нами предложена концепция многопрофильной печи для получения заготовок особо крупных прокатных валков толстолистовых станов 5000 и 5500, масса которых достигает 240...250 т, а также сплошных и полых кузнечных слитков массой до 300 т.

Печь ЭШН/ЭШП ЖМ-300 имеет две независимые плавильные позиции, объединенные общей рабочей платформой и отличающиеся производительностью и массой выпускаемой продукции. Первая позиция предназначена для выплавки слитков и заготовок диаметром до 1800 мм (массой до 80 т); вторая — слитков и заготовок диаметром от 1400 до 3200 мм (массой до 300 т).

Печь оснащена комплектом токоподводящих кристаллизаторов, а также дорнов (для выплавки полых слитков) и общим для двух позиций кантователем флюса.

Техническая характеристика комплекса печи ЭШН/ЭШП ЖМ-300

	Первая плавильная позиция	Вторая плавильная позиция
Максимальная масса слитка, т.....	80	300
Производительность установки, т/год до	20 000	45 000
Коэффициент сменности оборудования не менее	2,7	2,7
Режим работы позиции, ч/сут.	24	24
Толщина слоя наплавляемого металла, мм:		
при укрупнении слитка.....	—	до 500
при наплавке валка	до 200	до 200
Вертикальное перемещение подъемного стола, мм.....	до 9000	до 9500
Мощность источников силового питания, МВ·А.....	5	10
Количество источников питания устройства		
вращения шлаковой ванны, шт.	1	1(из двух блоков)
Рабочая скорость вытягивания слитка (заготовки), мм/мин.....	1...100	1...100
Грузоподъемность подъемного стола, кг.....	80 000	300 000
Максимальная расчетная температура, обеспечиваемая установкой сопутствующего нагрева, °С.....	850	850



Токоподводящий кристаллизатор для выплавки сплошных слитков имеет дополнительную секцию охлаждения, что удлиняет его, по сравнению с кристаллизаторами для наплавки валков и выплавки полых слитков, примерно вдвое.

Каждая позиция снабжена электродо-(дорно-)держателем, обеспечивающим токоподвод, крепление и центровку сменных консолей с малоплавящимися электродами или дорнами, которые используют при выплавке слитков соответственно сплошного сечения и полых.

Для подачи металла в кристаллизатор предусмотрены по две на каждую позицию заливочные установки с полезным объемом жидкого металла до 10 т. Для организации жидкого старта на печи предусмотрена отдельно стоящая шлакоплавильная установка с набором тигель-ковшей различной емкости.

С целью корректировки состава шлака и необходимости его раскисления применяется система дозированной подачи свежего шлака, чистого флюорита и раскислителей в шлаковую ванну.

Для поддержания и выравнивания температуры слитков и заготовок большой массы, медленно вытягиваемых из кристаллизатора, используется система сопутствующего подогрева.

Система электропитания комплекса ЭШП ЖМ предусматривает применение специальных трехфазных источников питания низкой частоты (трансформатор и тиристорный преобразователь) 50 Гц, 10000 В, примерно 0,1...10 Гц, 120 В. Для предотвращения опасности резонанса оборудования преобразователи имеют функцию регулирования частоты под нагрузкой. Выбор в пользу низкочастотных источников питания сделан с целью уменьшения влияния на внешние сети и снижения реактивных потерь в короткой сети печи. Мощность основных источников питания составляет 5 и 10 МВ·А соответственно для первой и второй позиции.

Помимо основного источника, каждая плавильная позиция оснащена источником питания для организации управления вращением шлака, который представляет собой трехфазный трансформатор с преобразователем частоты, значение которой должно быть строго синхронизировано с основным источником тока. Этот низковольтный и сильноточный трансформатор вращения шлака подключается к прорези в разделительной секции токоподводящего кристаллизатора и создает в ней круговой ток.

Вращение шлаковой ванны способствует исчезновению видимых электродуг на границе шлак-кристаллизатор, предотвращению быстрого локального износа последнего, а также выравниванию температуры по всему периметру токоподводящей секции и распределению жидкого металла каждой порции по сечению слитка (сплошного, полого или наплавке валка), что в свою очередь обеспечивает равномерное температурное поле ванны жидкого металла.

Для обеспечения бесперебойной работы установки питание каждой плавильной позиции комп-

лекса организуется от двух независимых вводов (рабочего и резервного) с автоматическим включением резерва.

Печь ЭШН/ЭШП ЖМ-300 предусматривает работу с использованием современной системы управления, представляющей собой трехуровневую распределительную компьютеризированную систему сбора данных и управления технологическими процессами ЭШП, уровни которой представлены следующим образом:

«0» — сенсоры и исполнительные элементы;

«1» — РАС (Programmable Automation Controller), пульты местного управления устройствами, локальный пульт ручного управления ИП и локальный пульт ручного управления процессом ЭШП на платформе кристаллизатора;

«2» — рабочая станция SCADA.

Система управления включает в себя несколько подсистем, выполняющих следующие функции:

централизованную визуализацию и контроль технологических параметров;

анализ производственной ситуации, отслеживание граничных значений параметров процесса, обработка аварийных ситуаций;

расчет и выдача рекомендаций оператору;

непосредственное управление ЭШП процессом в автоматическом режиме;

расчет и выдача значений уставок (заданий) регуляторам локальных систем автоматизации.

Отличительной особенностью системы управления является глубокое резервирование и наличие нескольких степеней защиты, что необходимо для «спасения» крупного слитка. Предусмотрена и возможность завершения плавки в режиме ручного управления.

Система управления снабжена программой инженерного расчета ESSR LModcal©, позволяющей моделировать затвердевание слитка (заготовки), что делает систему управления способной к самообучению и привлечению реальных значений замеров температурного поля, электрических показателей и других данных.

Возможности комплекса печи характеризует сортмент планируемой к выпуску следующей продукции:

кузнечные слитки, изготавливаемые двумя основными технологическими процессами — ЭШН ЖМ и ЭШП ЖМ. Максимальная масса кузнечного слитка должна быть 300 т, минимальная — 60 т (для слитка сплошного сечения). Максимальный диаметр кузнечного слитка, получаемого способом укрупнения предварительно выплавленных сплошных слитков, составляет примерно 2600 мм, минимальный — 1400 мм;

заготовки опорных прокатных валков толстолистовых станков с диаметром и длиной бочки соответственно до 2400, 6400, общей длиной до 11500 мм и опорных валков полосовых станков с диаметром и длиной бочки соответственно свыше 1800, и 2400 мм, общей длиной свыше 7000 мм,



наплавленные ЭШН ЖМ с толщиной наплавки до 200 мм всеми современными материалами, применяемыми для прокатных валков;

полые слитки, которые изготавливаются при использовании основного технологического процесса ЭШП ЖМ. Габариты и масса полых слитков/заготовок ограничены следующими параметрами: максимальная масса — 300 т, минимальная — 20 т; максимальный наружный диаметр 3200 мм, минимальный — 1400 мм, максимальная толщина стенки полого слитка — 700 мм.

1. *New plant concepts and further developments for the production of large sized ESR ingots* / H. Holzgruber, M. Ramprecht, B. Ofner et al. // Proc. of the China International Forgemasters meeting (May 24-27, 2010, Cheng du, China). — Cheng du, 2010. — P. 94-102.
2. Prof. Zhouhua Jiang, private communication, 2010.
3. Aoya Exhibition Co., Ltd. // <http://www.forging-expo.cn/english/project6/index.asp>
4. *ESR with two power sources and process control* / L. Medovar, V. Petrenko, A. Tsykulenko et al. // Proc. LMPС-2005, TMS, Santa-Fe, New Mexico, Sept. 11-14, 2005 (electronic).
5. *Вдовин К. Н.* Прокатные валки. — Магнитогорск: МГТУ, 2005. — 543 с.
6. *Новый способ сварки заготовок сверхкрупных сечений: электрошлаковая сварка неподвижным электродом с добавкой кусковых материалов (ЭШС КПМ)* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. П. Андреев и др. // Проблемы элект-

рошлаковой технологии. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 40-47.

7. *Аустель В., Хейман Г., Майдорн Х.* Производство крупных МХКВ-поковок и их свойства // Электрошлаковый переплав. — 1983. — Вып. 6. — С. 301-306.
8. *Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я.* Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 1. — С. 3-7.
9. *New possibility to utilize ESR for the ingot segregation reduction* / L. B. Medovar, V. I. Makhnenko, V. Ya. Saenko, T. V. Korolyova // A collection of theses for communication. Third Baosteel biennial academic conf. — BAC 2008. (26-28 Sept. 2009, Shanghai). — Shanghai, 2008. — V. 2. — P. 33-38.
10. *New Method of Low Segregation ESR forging ingots production (computer simulation of the ESR ingot enlargement)* / V. Makhnenko, L. Medovar, V. Saenko, T. Korolyova // Proc. of the Intern. Forgemasters Meeting, IFM-17, 2008, Santander, Spain, 3-7 Nov., 2008 (electronic).
11. Medovar B. I., Saenko V. Ya., Medovar L. B. *Electroslag Technologies in the XXI century* // Proc. of the ASIA steel international conference — 2000 (September 26-29, 2000, Beijing, China). V.C. — Benijing, 2000. — V. C: Steelmaking. — P. 40-43.
12. *Патон Б. Е., Медовар Б. И., Медовар Л. Б.* 40 лет ЭШП: есть ли перспектива? // Сталь. — 1998. — № 11. — С. 24-28.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Инжиниринговая фирма «Элмет-Рол», Киев

Поступила 16.08.2010

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТАЛЛУРГИЯ. МЕТАЛЛООБРАБОТКА

19-22 октября 2010 года в г. Ижевске состоится IX Международная специализированная выставка «Машиностроение. Металлургия. Металлообработка».

Организаторами выставок являются: Правительство Удмуртской Республики, Администрация города Ижевска, Удмуртская торгово-промышленная палата, выставочный центр «Удмуртия».

Основная цель проведения выставки — демонстрация достижений и возможностей предприятий Удмуртии, регионов России и стран зарубежья, чья продукция выпускается для промышленного и топливно-энергетического комплекса. В выставке примут участие около 100 ведущих российских и зарубежных предприятий. Они представят на суд специалистов и гостей новые технологии, оборудование и материалы для нефте-газодобывающей, химической промышленности, машиностроения, металлургической и металлообрабатывающей отраслей, литейного производства, энергетики, энергосберегающее оборудование и технологии, применяемые в промышленности и многое другое.

В дни работы выставок пройдет «Биржа субконтрактов», представляющая собой переговоры уполномоченных представителей предприятий-заказчиков с потенциальными поставщиками по вопросам изготовления и поставки изделий.

Помимо этого, ведущие вузы республики проведут ряд круглых столов, семинаров, совещаний. Также пройдет молодежный форум инновационных проектов.

В деловую программу выставки включена Биржа деловых контактов, которая позволит участникам максимально эффективно организовать работу на выставке, узнать заранее о компаниях, желающих посетить стенд, ознакомиться с пожеланиями посетителей (формат, тема встречи, участники встречи), провести встречи на удобной площадке специально оборудованной деловой зоны. Также в рамках выставок пройдет День молодого специалиста.

Информационную поддержку выставки осуществляют более 100 изданий и интернет-ресурсов России и ближнего зарубежья.

E-mail: metal@vcudmurtia.ru