



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

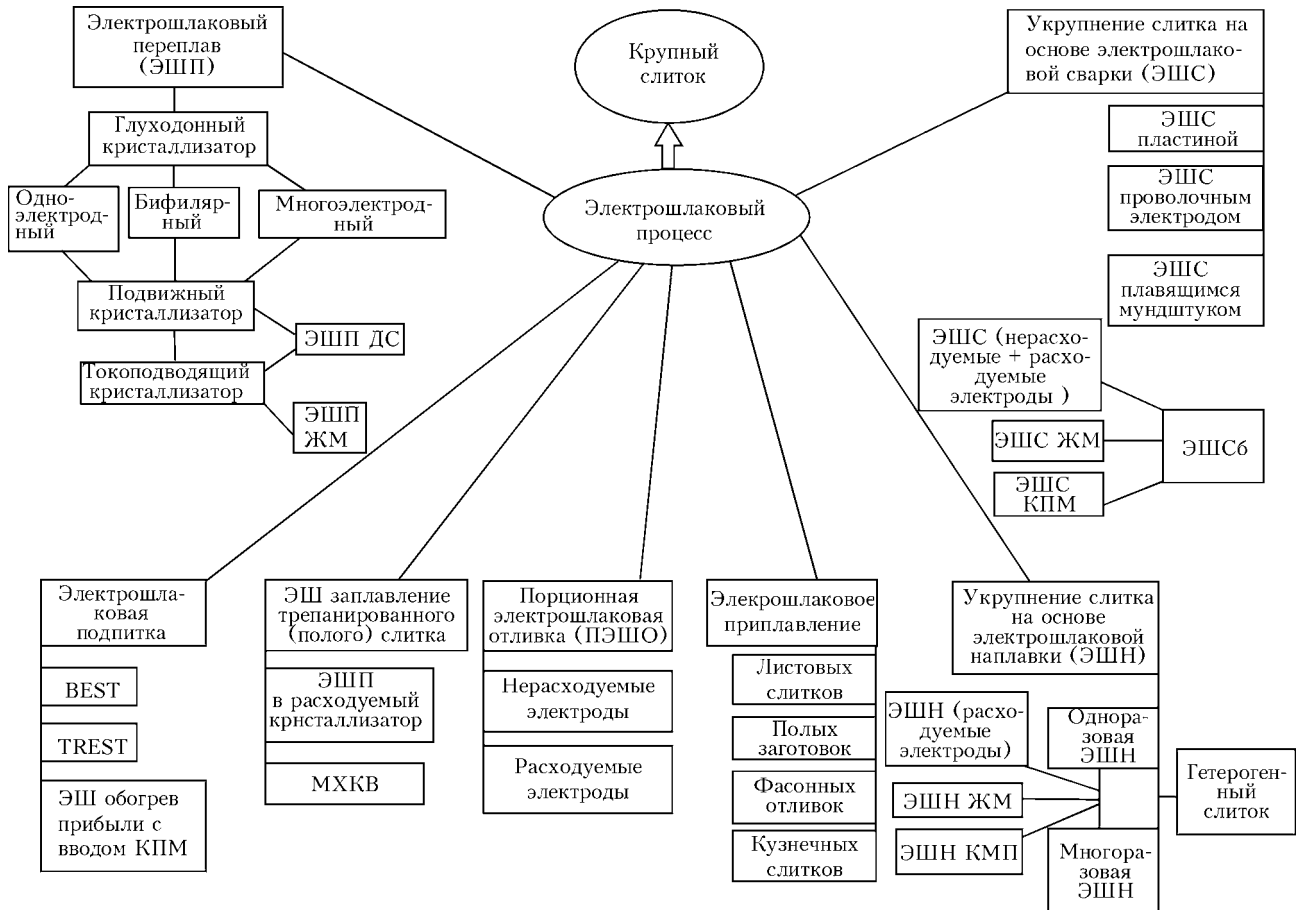


Рис. 1. Электрошлаковые технологии получения крупных слитков

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 переплавных 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-

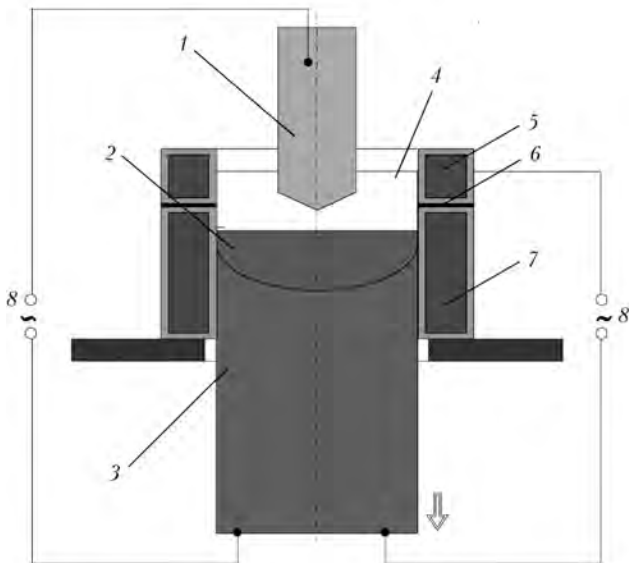


Рис. 2. Схема ЭШП ДС: 1 – расходный электрод; 2 – жидкометаллическая ванна; 3 – слиток; 4 – шлаковая ванна; 5 – токоведущая секция кристаллизатора; 6 – разделительная секция; 7 – формирующая секция кристаллизатора; 8 – источники питания

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-

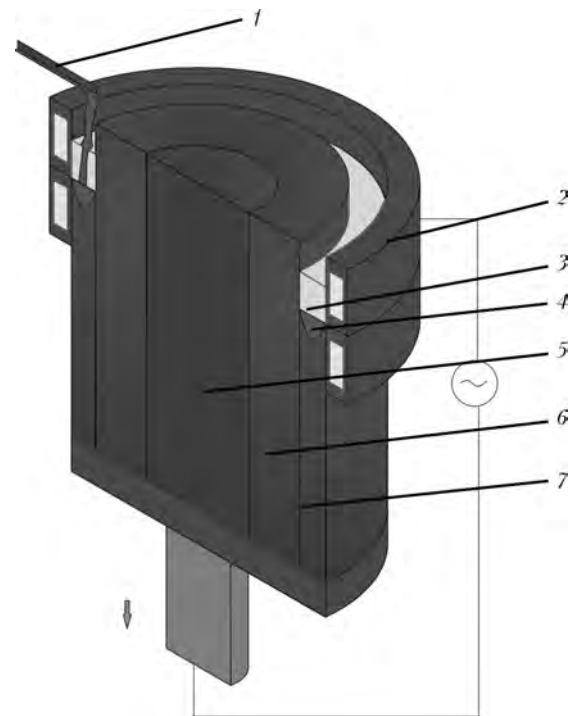


Рис. 3. Принципиальная схема ЭШН ЖМ; 1 – заливочное устройство для подачи жидкого металла в кристаллизатор; 2 – токоподводящий кристаллизатор; 3, 4 – соответственно шлаковая и металлическая ванна; 5 – центральный слиток; 6, 7 – слои металла соответственно после одно- и двукратной наплавки

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.

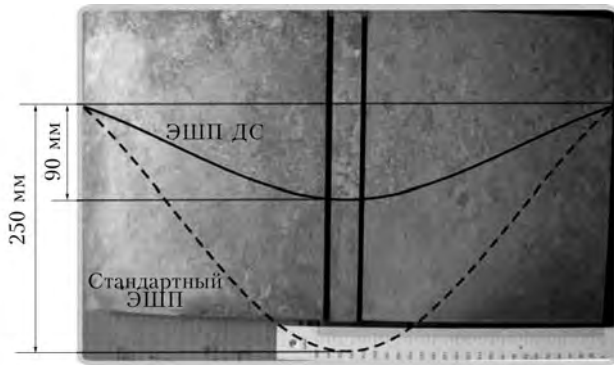


Рис. 4. Глубина металлической ванны в слитке ЭШП и ЭШП ДС диаметром 500 мм

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).

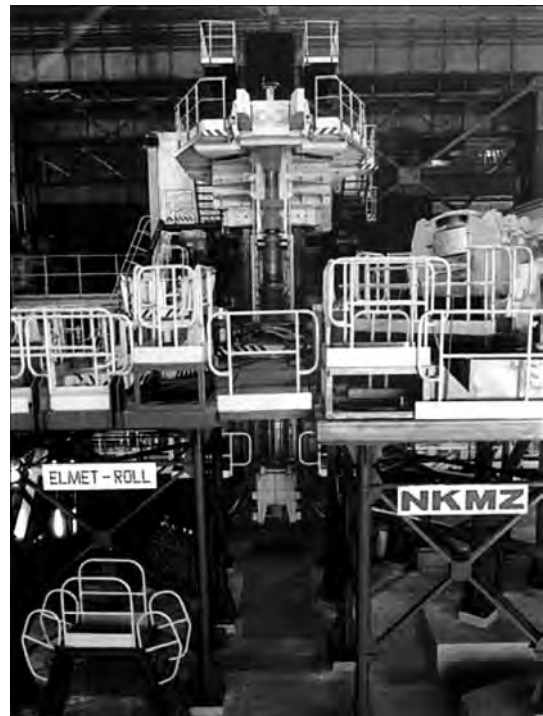


Рис. 5. Установка ЭШН ЖМ на Новокраматорском машиностроительном заводе

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» — ПАС (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* / Н. Holzgruber, М. Ramprecht, В. 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](mailto:metal@vcudmurtia.ru)