

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ

За 75 лет, прошедших со дня основания Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, создано множество новейших технологических процессов и образцов уникального оборудования для их реализации. Многие из них были первыми в мировой практике, надежно служат и сегодня прогрессу и на Земле, и под водой, и в космическом пространстве.

Прежде всего это касается различных видов сварочных процессов и оборудования, всего, что связано с ними, качества сварных швов и сварных соединений, прочности и надежности сварных конструкций, методов их диагностики и многого другого.

Борису Евгеньевичу Патону принадлежит особая роль в возникновении, становлении и развитии специальной электрометаллургии (СЭМ) — важнейшей для технического прогресса отрасли промышленности. Именно Б. Е. Патоном впервые в мире предложена идея использования сварочных источников нагрева (электрошлаковой ванны, дуговой плазмы, электронного луча) для переплавных процессов различных металлов и сплавов и придания им особо высокого качества и надежности.

К новым процессам СЭМ в первую очередь относится электрошлаковый переплав (ЭШП) расходо-емого электрода в водоохлаждаемую изложницу. Фундаментальные исследования сущности ЭШП, его физико-химических, металлургических и электротехнических особенностей, выполненные в Институте электросварки в середине 1950-х — начале 1960-х обеспечили на то время институту передовые позиции в области разработки и применения электрошлаковой технологии, литья, подпитки и др.

В очень короткие сроки электрошлаковый переплав был внедрен в промышленность. В мае 1958 г. на заводе «Днепрспецсталь» (ДСС) вступила в строй первая в мире промышленная печь ЭШП Р-909, спроектированная и изготовленная в Институте электросварки. Первой промышленной продукцией печей ЭШП здесь стала шарикоподшипниковая сталь ШХ-15, а ее первым потребителем — флагман советской подшипниковой промышленности 1-й Государственный подшипниковый завод в Москве. Затем к нему присоединился Запорожский моторный завод (головной в составе нынешнего ОАО «Мотор-Сич»).

В тот же период институтом совместно с НКМЗ спроектирована и изготовлена первая в истории ЭШП промышленная трехфазная печь ЭШП-2, предназначенная для выплавки стальных двухтонных кузнечных слитков. Печь введена в эксплуатацию на НКМЗ в 1958 г. На ней был освоен выпуск крупных кузнечных слитков массой до 2 т из 12%-й хромистой жаропрочной стали для дисков судовых газовых турбин. С этого момента началась эра промышленного использования ЭШП в бывшем СССР и в мире. Работа удостоена Ленинской премии за 1963 г.

Первой из стран Запада, проявивших деловой интерес к ЭШП, стала Франция. После посещения французскими представителями Института электросварки им. Е. О. Патона и завода «Днепрспецсталь» летом 1963 г. две фирмы (металлургическая «Компани дез ателье э форж де ла Луар» (КАФЛ) и электромашиностроительная «Компани электромеканик» (КЭМ) приобрели советскую лицензию на способ ЭШП и оборудование для его реализации.

Летом 1965 г. на заводе фирмы «КАФЛ» в г. Фермини, близ г. Сент-Этьена, введена в эксплуатацию первая в Западной Европе электрошлаковая печь (типа Р-951). Именно на этой печи впервые успешно освоен ЭШП шарикоподшипниковых, быстрорежущих, нержавеющей сталей и сплавов типа инконель. Через год заработала печь ЭШП в Шеффилде (Англия). Здесь было начато серийное производство печей ЭШП. В 1970 г. по советской лицензии запустили первую печь на фирме «Авеста» (Швеция), а в 1972–1974 гг. — ряд печей ЭШП в Японии.

В США в конце 1960-х гг. опубликована американская программа исследований в области ЭШП и поставлена задача догнать русских. Об успехах американцев, купивших в мае 1969 г. первую советскую лицензию на ЭШП, свидетельствует тот факт, что спустя 8 лет в США годовое производство электрошлакового металла в слитках достигло 126 тыс. т. Большинство печей ЭШП, работающих в США, построено американской фирмой «Консарк корпорейшн», ранее специализирующейся на производстве только печей ВДП.

Электрошлаковый переплав в бывшем СССР развивался стремительно, поскольку главными потребителями металла особо высокого качества стали производители вооружения и различной военной техники: военно-морского судостроения, танкостроения и др. В 1980-х гг. построены прекрасно оснащенные уникальные цехи ЭШП на НКМЗ (Краматорск), МК «Азовсталь» (г. Мариуполь), заводе «Красный Октябрь» (г. Волгоград).



Развитию ЭШП способствовала система прямой государственной поддержки ученых и специалистов, плодотворно трудившихся не только в Институте электросварки им. Е. О. Патона, но и во ВНИИЭТО, ЦНИИ «Прометей», ЦНИИЧермет, ВИАМ, ВИС, НИИХИМаш и др. Важен и тот факт, что изобретения, связанные с новыми технологическими процессами ЭШП и с оборудованием для их осуществления, запатентованы во многих странах мира (Франции, Японии, Швеции, США и др.), причем только Институт электросварки имеет более 600 зарубежных патентов в этой области.

Большие возможности для коренного улучшения структуры заготовительного производства машиностроения в середине 1970-х гг. открылись благодаря разработке в институте под руководством Б. Е. Патона разновидности электрошлаковой технологии — электрошлакового литья (ЭШЛ), которое на заводах тяжелого машиностроения позволяет полностью отказаться отковки литого электрошлакового металла и при этом объединить в машиностроительной заготовке оптимальную форму отливки и высокие механические свойства поковки. Примечательно, что высокое качество металла электрошлаковой отливки сочетается в ЭШЛ с чрезвычайно высоким выходом годного, достигающим 85...95 %, и полной ликвидацией брака в заготовительном производстве. Работа удостоена Государственной премии Украины за 1978 г.

В тяжелом и металлургическом машиностроении ЭШЛ нашло применение при изготовлении заготовок для горячей и холодной штамповки, цапф и подцапфовых плит к крупнотоннажным сталеразливочным ковшам, валков горячей и холодной прокатки труб, крупных коленчатых валов судовых дизелей, деталей промышленных тракторов, листосварных баллонов высокого давления.

В конце 1960-х – середине 1970-х гг. в Институте электросварки им. Е. О. Патона совместно с ПО «Ждановтяжмаш» (теперь ОАО «Азовмаш») разработана технология производства литосварных сосудов высокого давления, используемых для работы на повышенных параметрах. В начале 1980-х гг. там же создано специализированное оборудование, разработана и освоена технология ЭШЛ полых цилиндрических заготовок, днищ, патрубков и других деталей из аустенитной стали, а также организовано производство литосварных сосудов, предназначенных для работы в условиях сверхнизких температур и высоких давлений.

Основное назначение ЭШЛ и его разновидностей (центробежного ЭШЛ и электрошлакового кокильного литья) состоит не только в замене таких традиционных технологических процессов, как литье иковка. Его следует рассматривать в качестве одного из высокоэффективных и металлосберегающих способов заготовительного производства, позволяющего расширить выпуск заготовок и другой продукции с минимальной механической обработкой.

Одним из наиболее ярких примеров эффективного применения ЭШЛ является разработка и внедрение электрошлаковой технологии изготовления заготовок вварных бандажей цементных печей на заводе «Волгоцеммаш» (г. Тольятти). Данную работу проводили по инициативе Б. Е. Патона, который предложил оригинальную схему ЭШЛ заготовок вварного бандажа цементной печи наружным диаметром 6 м, толщиной 500 мм и массой 33 т. Технология ЭШЛ, разработанная в институте совместно с заводом «Волгоцеммаш», позволила решить проблему получения высококачественных стальных заготовок вварных бандажей обжиговых цементных печей, максимально приближающихся по форме и размерам к конечному изделию, что позволило уменьшить металлоемкость цементной печи на 147 т. Кроме того, значительно повысилась работоспособность, а в результате — производительность печи.

В начале 1970-х гг. в институте под руководством Б. Е. Патона разработан новый способ переплава металлического расходуемого электрода электрической дугой, горячей между торцом расходуемого электрода и поверхностью жидкой шлаковой ванны, в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе, получивший название дугошлакового переплава (ДШП). По сравнению с ЭШП, способ ДШП при выплавке слитков позволяет в 1,5 раза уменьшить расход электроэнергии, а также почти в 2 раза сократить расход синтетического флюса на 1 т металла. По качеству металл ДШП практически не уступает металлу ЭШП. Главным достоинством ДШП является возможность легировать металлы азотом из газовой фазы, в том числе под давлением, при полном исключении из технологического процесса производства высокоазотистых сталей и сплавов дорогостоящих азотсодержащих соединений, например нитрида кремния.

В результате проведенных в 1990-е гг. опытно-промышленных работ показано, что ДШП может быть эффективен при производстве титана и его сплавов и позволяет получать крупные листовые слитки (массой 5 т) с хорошей поверхностью и высокого качества.

В последние годы благодаря разработке в Институте электросварки нового технологического процесса электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ), новой технологической схемы ЭШП с двумя источниками питания (ЭШП ДС) и использованием токоподводящего кристаллизатора открылись новые возможности для совершенствования технологии получения биметаллических заготовок и изделий различного назначения, таких как композитные заготовки валков прокатных станов, биметаллическая арматура, подовые сталемедные электроды дуговых печей и др.

Безусловным преимуществом процесса ЭШН ЖМ является возможность наплавки материалами самого различного химического состава (нержавеющими, инструментальными и быстрорежущими сталями, жаропрочными никелевыми сплавами и др.). При этом высокого качества биметаллических заготовок

достигают при их значительно более низкой стоимости, чем при ЭШН с применением расходующихся электродов.

В рамках совместных работ с ЗАО «НКМЗ» выполнен проект соответствующей адаптации печи ЭШП и создан первый в мире промышленный агрегат для производства способом ЭШН ЖМ композитных заготовок прокатных валков диаметром до 1000 мм, длиной наплавляемой бочки до 2500 мм и массой до 25 т, накоплен значительный опыт изготовления композитных заготовок с высокохромистым наплавленным рабочим слоем. Применение таких валков показало, что их стойкость в 2...3 раза выше, по сравнению с серийными чугунными валками, использовавшимися ранее. Технология ЭШН ЖМ реализована также при изготовлении биметаллических заготовок диаметром 35 мм с коррозионно-стойкой наплавкой из аустенитной стали типа 316L и основным слоем из стали 20ГС для биметаллического арматурного профиля.

Сегодня ЭШП наряду с ВДП, ПДП, ЭЛП является основой специальной электрометаллургии. По разным оценкам, в мире выплавляют около 1,5 млн т металла ЭШП ежегодно, при этом около половины — в Китае. Ныне ЭШП — это стандартный, хорошо изученный металлургический процесс, однако перед металлургами ЭШП стоят новые сверхсложные задачи — прежде всего получение высококачественных гигантских сплошных и полых стальных слитков массой до 300 т и более (возможно), а также на порядок меньшей массы слитков жаропрочных сплавов. Казалось бы, что эти задачи известны и более или менее удачно решены почти 30 лет назад, в частности для нужд энергетики. Однако сейчас они значительно усложнились. Их предстоит решить для нового поколения сталей и сплавов.

Не менее сложную задачу предстоит решить применительно к изготовлению литых полых заготовок ЭШП диаметром 4...5 м для толстостенных сосудов ответственного назначения, в т.ч. для атомной энергетики и нефтехимии.

Электронно-лучевой переплав (ЭЛП) — один из наиболее эффективных способов повышения служебных характеристик металлов и сплавов, прежде всего при получении особо чистых тугоплавких металлов (ниобия, тантала, циркония, молибдена и др.). Благодаря высокой степени рафинирования и формированию более однородных по химическому составу и структуре слитков существенно повышаются физико-механические свойства металлов и сплавов, увеличивается их технологическая пластичность.

В отличие от ВДП, к расходующейся заготовке для ЭЛП предъявляются минимальные требования, что позволяет уменьшить расход металла. Одновременно достигают значительного сокращения трудовых (количество операций по переделу) и энергетических затрат.

Первую отечественную промышленную установку ЭЛП разработали и создали в ИЭС, а внедрили на Донецком химико-металлургическом заводе. На Артемовском заводе наладили выпуск холоднокатаного листа ниобия и тантала электронно-лучевой выплавки. Разработаны технологии переплава ванадия, циркония, меди для электронной промышленности.

Получили развитие способы ЭЛП с применением промежуточной емкости и способ выплавки плоских слитков в горизонтальном кристаллизаторе. ЭЛП позволяет получать не только особо чистые металлы, но и сплавы с особыми функциональными свойствами. Для электротехнической и аэрокосмической промышленности в конце в 1960–1970-х гг. в ИЭС разработан ряд оригинальных сплавов на основе никеля, ниобия, молибдена с повышенной низкотемпературной пластичностью. Особое место в электронно-лучевых технологиях занимает производство слитков из титана и его сплавов.

Научный и практический подход Б.Е. Патона к решению реальных технических задач для нужд отечественной промышленности позволил в короткий срок разработать технологию, изготовить оборудование для электронно-лучевой плавки, а также создать научно-производственный центр «Титан» с мини-заводом вакуумной металлургии производительностью до 3000 т титановых сплавов в год.

Разработаны новые отечественные сплавы из титана с более высоким уровнем механических и эксплуатационных свойств, чем существующие в мировой практике, для использования в медицине, химическом машиностроении, автомобилестроении, в авиационной и военной технике (сплавы Т80 и Т90, заменяющие соответственно сплавы ОТ4-1 и ОТ4 и превосходящие их по уровню свойств и свариваемости, сплавы ТЮО, превосходящие по механическим свойствам широко известный сплав титана ВТ6 (Grade5), и Т-110, который по технологичности, свариваемости и работоспособности в условиях циклических нагрузок превышает широко используемый в авиации сплав ВТ22).

Первый отечественный высокопрочный сплав Т-110 предназначен для использования в самолетостроении (например, лайнерах АН70 и АН148). Для дальнейшего снижения себестоимости и трудоемкости изготовления слитков титана из первичного сырья в ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мире разработана технология электронно-лучевого переплава с промежуточной емкостью (ЭЛПЕ) недробленых блоков губчатого титана массой 0,7...3,8 т, что позволяет исключить из технологического цикла производства слитков не только этап проросования расходующего электрода для последующего переплава, но и операцию дробления блоков губчатого титана.

Предложенная технология ЭЛПЕ блоков губчатого титана обеспечивает повышение на 20 % технико-экономических показателей, в сравнении с ЭЛПЕ дробленого губчатого титана. Для реализации данного способа в ИЭС им. Е.О. Патона в 2004 г. создали не имеющую аналогов электронно-лучевую установку

УЭ5810, позволяющую совместить процессы оплавления боковой поверхности блока на этапе предварительного подогрева и плавки в одной вакуумной камере. Использование указанной технологии в условиях промышленных предприятий позволило организовать в Украине конкурентоспособное на мировых рынках производство высококачественных слитков и слитков-слябов титана. Для сокращения потерь металла в ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мире предложена, вместо механической обработки, технология оплавления электронным лучом боковой поверхности слитков как круглого, так и квадратного сечений, а также слитков-слябов, создано соответствующее оборудование. Разработка удостоена Государственной премии Украины за 2006 г.

Оплавление таких слитков осуществляется за счет нагрева и расплавления поверхностного слоя слитка электронным лучом вдоль его образующей одновременно по всей длине. У круглых слитков ванна жидкого металла перемещается по поверхности слитка благодаря его вращению вокруг своей оси, а у слитков квадратного сечения и слитков-слябов — с управлением развертками электронного луча.

Процесс электронно-лучевого оплавления поверхностного слоя слитков характеризуется высокой плотностью подводимой энергии, легкостью контроля и управления технологическими параметрами, а также экономией до 15 % металла, в зависимости от массы оплаваемого слитка.

Впервые в мировой практике предложены технология получения горячекатаных труб непосредственно из литых трубных заготовок (успешно внедрена на Никопольском Южно-трубном заводе в 1998–2000 гг.), а также технология производства полых слитков для изготовления крупногабаритных титановых труб и колец из отечественных титановых сплавов.

Идея плазменно-дугового передела (ПДП) металлов и сплавов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе полностью принадлежит Б.Е. Патону. Он предложил заняться разработкой этого процесса в самом начале 1960-х гг. К тому времени в ИЭС им. Е.О. Патона уже были разработаны ЭШП и ЭЛП. Начав заниматься ПДП, институт тем самым замыкал все три физически возможных случая взаимодействия с жидким металлом второй фазы — шлака, вакуума и газов — в различных вариантах.

Работы в области плазменного передела развивались значительно быстрее, чем у двух других способов вторичного передела. Это объясняется тем, что они основывались на опыте, накопленном при разработке ЭШП и ЭЛП. Уже в 1966 г. на Свердловском заводе ОЦМ введена в эксплуатацию первая в мире промышленная печь для передела сплавов на основе платины и палладия, используемых при производстве стекловолокна, потенциометрических сплавов, приборов слепой посадки самолетов и, наконец, производстве микрочипов.

На этом заводе впервые в мире были получены чистые иридий и осмий в плавном состоянии. До этого их производили только в виде спеченных брикетов. Этому успеху способствовало то, что слитки драгоценных металлов малогабаритны, и указанному заводу полностью подошла печь на слиток диаметром всего лишь в 100 мм. Через год на Ижевском металлургическом заводе вошла в строй плазменно-дуговая печь на слиток диаметром 150 мм, металл которой с успехом использовался для изготовления некоторых деталей всемирно известной автоматической винтовки конструкции Калашникова.

В 1967 г. на электрометаллургическом заводе в г. Электросталь запущена плазменно-дуговая печь новой конструкции для производства специальных сталей и сплавов. На ней выплавляли слитки массой 0,5 т и больше. Далее последовали печи не только для передела прецизионных сплавов, но и для производства слитков компактного химически чистого титана из губчатого металла (Запорожский титано-магнелиевый комбинат), а также слитков титановых сплавов различного назначения.

Б. Е. Патон предложил применить плазменную плавку для переработки отходов титана. В короткие сроки в лабораториях ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования процесса плазменной плавки из листовых отходов, стружки и отходов губчатого титана. Руководство Министерства цветной металлургии обратилось к Борису Евгеньевичу с просьбой о создании промышленных печей для этих целей. Такие печи были спроектированы, изготовлены и совместно с Алчевским металлургическим комбинатом и Запорожским титано-магнелиевым комбинатом сданы в эксплуатацию в 1972 г. и 1979 г.

На Алчевском металлургическом комбинате впервые в мире способом плазменной плавки получены плоские слитки размером 800×120×1300 мм из 100 % листовых отходов титана. После прокатки слитков из листа изготовляли химическое оборудование, успешно эксплуатируемое на предприятиях химического комплекса. Плазменная двухручьева печь УП-100, установленная на Запорожском титано-магнелиевом комбинате, позволяет выплавлять из отходов губчатого титана одновременно два слитка диаметром до 300 мм и длиной 2500 мм, а также два плоских слитка размерами 400×200×2500 мм. Уникальность печи заключается в том, что она дает возможность выплавлять как одновременно два слитка, так и попеременно по одному слитку с переливом из одного кристаллизатора в другой.

Слитки использовали в качестве расходных электродов в вакуумно-дуговых литейных печах для получения литых изделий.

Тысячи единиц запорной титановой арматуры установлены на предприятиях химической промышленности во многих странах СНГ. Серьезную проблему представляла рациональная переработка отходов титана, накапливавшихся на авиационных и моторостроительных заводах. На Запорожском моторном

заводе (ОАО «Мотор-Сич») существующая промышленная печь ВДЛ-4 была оснащена разработанным в ИЭС им. Е. О. Патона нерасходуемым электродом с рабочим током до 20 кА для получения отливок ответственного назначения из 100 % отходов литья.

Мощность плазменно-дуговых печей постоянно росла и достигла выплавки 3,5-тонного слитка на Ижевском металлургическом заводе. В короткие сроки с помощью плазменно-дуговых печей решен ряд крупных экономических задач, в частности, для производства высокопрочных канатов для сверхглубоких шахт (Ижевский металлургический завод); внесен существенный вклад в решение проблемы вторичного титана; получена биметаллическая сверхтонкая лента для магнитной записи программ спутников Земли, работающих на орбите в длительном автоматическом режиме (Ленинградский сталепрокатный завод) и др.

Поскольку в 1960-х – 1970-х гг. мощности электропечестроения в СССР были развиты слабо, для скорейшего распространения плазменно-дугового переплава академик Б. Е. Патон предложил собственную идею, которая заключалась в том, чтобы осуществлять процесс ПДП в корпусе вакуумно-дуговой печи. Этот новый вариант плазменно-дугового переплава получил название переплава расходуемого плазмотрона (ПП).

Суть предложенного способа переплава состояла в том, что для переплава вместо сплошного расходуемого электрода использовали расходуемый электрод с осевым отверстием (полый электрод), через которое в процессе плавки в зону дуги подается плазмообразующий газ. Состав газа можно варьировать в зависимости от требований технологии, т. е. это может быть инертный газ либо газовые смеси, в состав которых наряду с инертными входят, например азот или водород, взаимодействующие с жидким металлом.

Эта идея базировалась на прекрасном знании процесса вакуумно-дугового переплава и на использовании физического явления так называемого эффекта полого катода. При определенных параметрах электрического режима внутренняя поверхность электрода может одновременно выполнять роль катода и стенок сопла плазмотрона. В результате дуговой разряд по своим физическим характеристикам переходит в плазменный.

Переплав расходуемого плазмотрона впервые осуществлен в промышленных масштабах на электрометаллургическом заводе «Днепропецсталь» (г. Запорожье) в 1973 г. Выплавлены слитки диаметром 320 мм (массой до 1 т) из высокопрочной и жаропрочной азотсодержащей стали. Параллельно с увеличением мощности плазменных печей происходило совершенствование и наращивание единичной мощности дуговых металлургических плазмотронов.

Первые плазменно-дуговые печи были оснащены дуговыми плазмотронами постоянного тока, способными в течение продолжительного времени (до 50 ч) работать на токе до 500 А. В дальнейшем на основании широких исследований создали ряд дуговых металлургических плазмотронов серии ПДМ, способных работать длительное время (достаточное для ведения одной плавки) на токах 5...6 кА.

Переломным этапом в создании мощных металлургических плазмотронов явился переход на принципиально новый способ повышения стойкости электродов – применение плазменных катодов и создание трехфазных плазменно-дуговых комплексов переменного тока. Работы, связанные с созданием и исследованием мощных металлургических плазмотронов постоянного и переменного тока с плазменным электродом, проводились по инициативе Б. Е. Патона. Такие плазмотроны мощностью до 2 МВт и с большим ресурсом получили признание во многих промышленно развитых странах и защищены патентами США, Англии, Германии, Франции, Японии и других стран. Созданные на их основе плазменные нагревательные комплексы переменного тока (трехфазная группа плазмотронов и источники питания к ним) мощностью до 5 МВт закуплены и успешно освоены фирмами «Крупш» (Германия), «Ниппон стил» (Япония) и ОАО «Буммаш» (Россия).

Особого внимания заслуживают работы, посвященные плазменно-дуговым комплексам, поскольку в металлургии они оказались наиболее приемлемыми как по технически более простому оснащению, так и по технологическим возможностям. Такими комплексами могут оснащаться дуговые сталеплавильные печи. В этом случае плазменно-дуговой комплекс используется вместо графитовых электродов. Трехфазные комплексы дуговых плазмотронов находят широкое применение при создании переплавных печей с формированием слитка в охлаждаемом медном кристаллизаторе (печи УП100, У600), их можно также применять для интенсификации плавки в индукционных печах открытого типа или вакуумных (комплекс ПДТУ-300).

Одним из направлений в развитии прогрессивных плазменных технологий стала плазменная внепечная обработка стали. Применение плазменных источников тепла в этом процессе позволило избежать недостатков, присущих ковш-печам с дуговым нагревом, а также достичь более высокого качества стали. Данными разработками заинтересовалась японская фирма «Ниппон стил». В 1988 г. на этой фирме в технологической цепочке домна-конвертер-плазменная внепечная обработка стали-машина непрерывного литья был введен в эксплуатацию 100-тонный ковш-печь, оборудованный плазменным нагревательным комплексом ИЭС им. Е. О. Патона мощностью до 5 МВт.



В 1996 г. на ОАО «Буммаш» (г. Ижевск) успешно ввели в эксплуатацию ковш-печь вместимостью до 30 т, оснащенный плазменным нагревательным комплексом ИЭС им. Е. О. Патона мощностью до 4 МВт. Скорость нагрева стали в ковше-печи достигает 4... 15 °С/мин.

В 1975 г. Б. Е. Патон предложил коренным образом изменить способы обработки поверхности слитков перед деформацией, основанные на использовании плазменных источников нагрева. Так, в ИЭС им. Е. О. Патона появилось новое направление — плазменно-дуговое рафинирование поверхности (ПДРП), безотходный способ устранения поверхностных дефектов. Освоению данной технологии предшествовал большой объем физико-химических и технологических исследований, включивший изучение теплообмена, газодинамического давления плазмы на металл, локального взаимодействия металла с газом в пятне нагрева и т. д.

Указанные исследования были необходимы для управления глубиной проплавления поверхностного слоя, размерами ванны, а также предотвращения слива металла с цилиндрической поверхности вращающегося слитка с учетом особенностей ПДП поверхностного слоя заготовок из металлов с высокой теплопроводностью. Конструкторско-технологические работы выполнялись совместно с организациями Минчермета, Минцветмета и Минавиапрома СССР.

На заводах «Электросталь», ВСМПО (Россия) и «Днепрспецсталь» (Украина) создали специализированные участки, оснащенные многоплазмотронными высокопроизводительными агрегатами ПДРП, предназначенными для обработки плоских заготовок и цилиндрических слитков диаметром до 800 мм и длиной до 3 м. Область их применения охватывает жаропрочные дисперсионно-твердеющие сплавы на никелевой основе, нержавеющие стали для тонкостенных труб, магнитно-мягкие сплавы и др. В 1990-е гг. на этих заводах основную массу слитков специальных сплавов ВДП обрабатывали с применением плазменно-дугового нагрева.

Наряду с признанными способами, в свое время составившими основу специальной электрометаллургии (выплавки, рафинирования и обработки специальных сталей и сплавов), необходимо отметить разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона в начале 1980-х г. процесс выплавки слитков на основе индукционного нагрева — индукционный переплав в водоохлаждаемом медном секционном кристаллизаторе (ИПСК). Этот процесс, который использует мягкий нагрев, присущий индукционному источнику тепла, позволяет в отсутствие контакта жидкого металла с огнеупорами получать и рафинировать высокорекреационные металлы и сплавы на их основе.

В ИЭС им. Е.О. Патона разработан ряд установок и технологий, основанных на ИПСК, внедренных в различных отраслях (утилизация отходов титана — «Киевтрактородеталь», Украина; рафинирование отходов ванадийсодержащих лигатур — Ленинадский комбинат редких металлов, Таджикистан; рафинирование черновых редкоземельных металлов — Киргизский горно-металлургический комбинат; утилизация и рафинирование драгоценных металлов платиновой группы — Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов, Россия).

Приведем прогнозную оценку перспектив дальнейшего развития СЭМ, которая была дана в статье Б. Е. Патона, В. И. Лакомского, Г. М. Григоренко, Л. Б. Медовара «Специальная электрометаллургия: полвека в действии. Что дальше?» (Специальная электрометаллургия. — 2003. — № 4. — С. 3–7): **«Специальная электрометаллургия с первых дней своего рождения была и, по нашему мнению, надолго останется металлургической базой для таких прогрессивных областей деятельности человека, как авиация, космическая техника, электроника, медицина, энергетика».**

В. Я. Саенко