



УДК 669.187.58.001.1

## СПЕЦИАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА\*

Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар

Сделана попытка оценить современное состояние и перспективы черной металлургии, включая специальную электрометаллургию. Показан ступенчатый, скачкообразный характер развития металлургических технологий за последние десятилетия. Сделан вывод о приближении очередного периода бурного совершенствования основных металлургических технологий.

An attempt was made to estimate the state-of-the-art and prospects of ferrous metallurgy, including the special electro-metallurgy. The step, jumpy nature of the development of metallurgical technologies over the recent decades is shown. A conclusion predicts the approaching next rapid updating of major metallurgical technologies.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав; вакуумно-дуговой переплав; суперсплавы; титан; интерметаллиды

Термин «специальная электрометаллургия» был предложен в Институте электросварки им. Е. О. Патона в середине 60-х годов прошлого века. Появление такого термина связано с рождением новой подотрасли черной металлургии, специализирующейся на производстве в значительных масштабах, измеряемых сотнями тысяч тонн, сталей и сплавов особо высокого качества на основе переплавных процессов, прежде всего электрошлакового и вакуумно-дугового. Отметим тут одну лингвистическую деталь. В русском и украинском языках слово «специальный» имеет оттенок, прямо указывающий на отношение чего-то или кого-то к военной тематике. В то же время английское эквивалентное «special» имеет прямую связь с высоким качеством или особым положением, в частности в нашем случае, металла. Например, всемирно известный производитель суперсплавов фирма «ИНКО» входит сегодня в консорциум «Special Metals». Таким образом, в русском, украинском и английском языках термин «специальная электрометаллургия» точно описывает производство и области применения металла высшего качества.

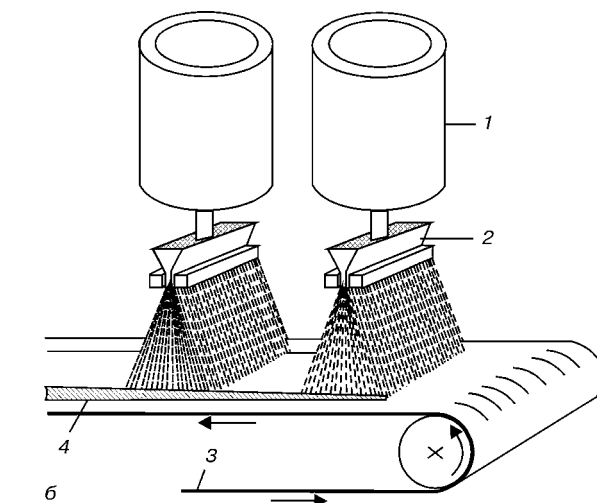
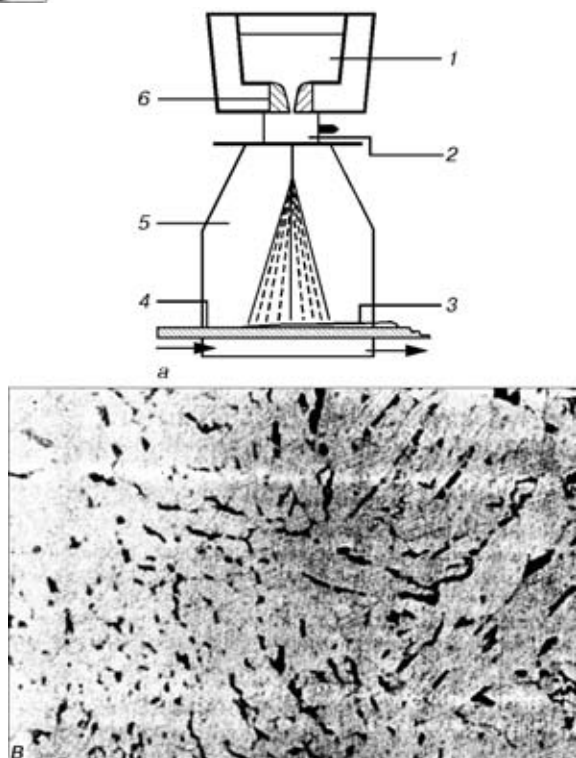
К способам специальной электрометаллургии и у нас в стране, и за рубежом, кроме упомянутых

выше ЭШП и ВДП, причисляют вакуумно-индукционную плавку, а также все разновидности плазменных и электронно-лучевых металлургических технологий и, следовательно, производство не только стали и суперсплавов, но и других конструкционных материалов, в том числе титановых сплавов, интерметаллидов и др. Тем не менее, и сегодня специальная электрометаллургия тесно связана с черной металлургией. Бурное развитие как вакуумных, так и иных средств внепечной обработки и их применение в производстве сталей и суперсплавов наивысшего качества привело к изменению понятия специальная электрометаллургия. Например, сегодня нет нужды подвергать ЭШП высокопрочные и шарикоподшипниковые стали, а никелевые суперсплавы зачастую прямо проходят через АОД/ГКР без вакуумно-индукционной плавки. В связи с этим в последнее время иногда термин «специальная металлургия» применяют вместо «специальная электрометаллургия». Естественно, что терминология устоится только в течение некоторого времени. В любом случае, без оценки тенденций развития черной металлургии анализ состояния и перспектив специальной электрометаллургии будет неполным.

Попытаемся проследить некоторые тенденции и перспективы развития большой металлургии, а лишь затем и ее важнейшей подотрасли — специальной электрометаллургии. Это тем более важно,

\* Данная статья является изложением доклада, представленного на Международной научно-технической конференции «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра» (8–9 октября 2002 г., Киев, Украина)

© Б. Е. ПАТОН, Л. Б. МЕДОВАР, 2002



Схемы процессов распыления: *a* — O'Sprey: 1 — жидкий металл; 2 — переходник; 3 — полоса; 4 — подложка; 5 — камера с инертным газом; 6 — круглое сопло; *b* — LDC (Liquid Dynamic Compaction): 1 — жидкий металл; 2 — продольное сопло; 3 — «непрерывная» подложка; 4 — полоса; 5 — микроструктура полосы стали 08кп, полученной распылением (X100)

что сталь остается основным конструкционным материалом в современном мире, а для Украины и России черная металлургия (и специальная электрометаллургия) есть и на ближайшие годы будет ключевой отраслью экономики.

За последние 40–50 лет в черной металлургии произошли разительные изменения как в создании принципиально новых технологий и материалов, так и в совершенствовании традиционных. Представляется, что действительно эпохальными для черной металлургии за этот период явились кислородно-конвертерное производство стали, ее внепечная обработка и непрерывная разливка. Именно три этих ключевых технологических процесса определили техническое и экономическое лицо современного металлургического производства (даже прямое восстановление железа сегодня имеет меньшее значение).

К концу 80-х — началу 90-х годов прошлого столетия казалось, что эпоха стремительных изменений закончилась, а в металлургии наступил период накопления, постепенного совершенствования. Однако именно в этот период начался новый этап качественных изменений. К сожалению, нашим металлургам относительно мало знакомо имя человека, олицетворяющего это время. Звали его Кен Айверсон. Именно он, будучи во главе американской компании «Ньюкор Стил», осуществляющей выпуск стали на обычном мини-заводе, первым в мире решился построить все производство компании на основе непрерывной разливки тонких слябов и последующей их прямой прокатки на лист. Вполне очевидная идея приблизить сечение непрерывно-литой заготовки к сечению прокатываемой продукции и, более того, соединить разливку и про-

катку в единую и непрерывную линию, единый агрегат, иногда называемый сегодня литейно-прокатным [1], давно привлекала металлургов. Естественно и то, что к моменту начала взлета «Ньюкор Стил», т. е. около 15 лет назад, в мире существовало достаточно много различных, как теперь говорят «пилотных» проектов непрерывного литья тонких слябов. Проблема была в том, чтобы принять решение и Кен Айверсон не побоялся сделать это. А сегодня в мире уже более 30 млн. т стали производят таким образом. Сама фирма «Ньюкор Стил» из мини-завода превратилась в крупнейшего производителя стали в США. О своем пути руководителя современного и успешнейшего металлургического предприятия К. Айверсон рассказал в книге «Прямой разговор» [2]. Революционные решения этого человека, умершего в апреле нынешнего года, сродни тем, что хорошо известны в нашей стране. Речь идет, конечно же, о такой неординарной личности как Н. С. Хрущев и его решению приобрести лицензию на кислородно-конвертерную плавку для Новалинецкого металлургического комбината.

Именно смелые решения того времени привели к появлению первого в мире завода со 100 %-ной непрерывной разливкой стали, прежде всего кислородно-конвертерной выплавки. Нет нужды доказывать, что в полном соответствии с законами диалектики сейчас черная металлургия находится в стадии количественных изменений, а это значит, что впереди нас ждет очередной этап скачкообразного перехода количества в качество. Пожалуй, единственный шанс металлургов нашей страны состоит в том, чтобы совершить качественный скачок сейчас, а не только повторять уже пройденный путь и пытаться



догнать передовые металлургические компании за счет дешевой рабочей силы и покупки пусть самых современных на сегодня, но уже используемых кем-то и где-то технологий и оборудования. Только сочетание разумного риска с применением новейших научных и технологических разработок позволит и России, и Украине вернуться в ряд ведущих металлургических стран.

Пример с кислородно-конвертерным переделом и непрерывной разливкой уже стал классическим для металлургов бывшего СССР. Однако все это в прошлом. Что же можно порекомендовать действительно нового сейчас? Есть ли у нас пионерские разработки, подобные испарительному охлаждению доменных печей или ЭШП, лицензии на которые покупали практически все промышленно-развитые страны? Думается, что есть. Каждому лидеру нашей металлургической промышленности следует, опираясь на мировую научную мысль, вести свой собственный поиск и принимать свои решения и тогда на металлургических заводах нашей страны снова появятся действительно оригинальные и новые технологии и оборудование. Нужно только помнить, что ученые-материаловеды всегда были сильны в бывшем СССР и остались таковыми и сегодня.

Здесь нам хотелось бы остановиться на двух потенциальных возможностях, которые, на наш взгляд, еще не нашли достойного понимания. Речь идет о таких традиционных для металлургов материалах, как кипящая сталь и биметалл.

Более 10 лет назад было показано [3], что на основе таких процессов распыления жидкого металла, как O'Sprey и/или LDC (Liquid Dynamic Coarction), можно сформировать непрерывную полосу из кипящей стали толщиной 10... 20 мм и направить ее в прокатный стан (рисунок). При этом есть все основания полагать, что качество стали благодаря высочайшей скорости кристаллизации будет приемлемым для использования ее наравне со спокойной сталью.

Преимущества биметаллической продукции известны давно. Немало в этой области было сделано и в нашем институте. Да и сегодня биметаллический лист наивысшего качества получают с помощью электрошлакового переплава и наплавки. Сейчас появились первые признаки того, что в ближайшее время биметаллический прокат в виде всевозможных профилей преимущественно строительного сортамента, в том числе арматурная сталь, будет все шире применяться в промышленности. В таблице приведены данные компании «Stelax» о коррозионной стойкости традиционной арматуры, арматуры из нержавеющей стали и биметаллической, названной Nuovinox, а также дано сравнение стоимости арматуры различных типов. Данные эти весьма красноречивы и не требуют дополнительных комментариев. Кроме того, в последнее время биметаллическая продукция (и не только арматура) этой

Материал арматурного профиля	Средний срок службы до первого ремонта	Относительная стоимость арматурного профиля
Углеродистая сталь	8–20 лет	1
Углеродистая сталь, покрытая эпоксидной смолой	13–25 лет	1,5
Биметалл: углеродистая сталь+ нержавеющая сталь	75 лет	3
Нержавеющая сталь	75 лет	6,5

фирмы стала все шире применяться при ремонте и строительстве новых мостов и введена в соответствующие нормативные документы в США. Получение такого рода продукции возможно на основе созданной в нашем институте в последние годы разновидности ЭШП — с жидким металлом, без расходуемых электродов [4].

Сегодня большинство новых конструкционных металлических материалов появляется для удовлетворения нужд авиации, космоса и других, как принято говорить теперь, «критических» применений. Однако пример Nuovinox свидетельствует о том, что и строительные стали в ближайшем будущем станут иными и металлургам нужно готовиться сегодня к ускоренным изменениям рынка даже традиционных видов проката.

Вызов времени весьма существенно влияет и на специальную электрометаллургию. Мы полагаем, что перспективы специальной электрометаллургии прослеживаются сегодня в производстве суперсплавов, титана и его сплавов, а также интерметаллидов для газотурбостроения как энергетического, так и авиационного. Ожидается, что именно в области специальной электрометаллургии начнется очередной качественный скачок и в технологиях, и в материалах.

Общим для всех этих разнообразных технологических процессов сегодня стало то, что они должны вестись, и в ряде случаев уже ведутся, только на основании тщательного математического моделирования требуемой потребителями структуры металла, а не просто расчета профиля и глубины двухфазной зоны при затвердевании заготовок. Опыт применения такого рода моделей при выплавке суперсплавов положителен. И сегодня при разработке технологии ВДП и ЭШП сплавов типа Инконель опираются на математическое моделирование без натуральных дорогостоящих плавов. Очевидно, что для получения таких результатов нужна совершенная система управления технологическим процессом, гарантирующая постоянство условий кристаллизации металла на всем протяжении плавки. Можно с уверенностью сказать, что в ближайшие годы в специальной электрометаллургии магистральным направлением будет именно разработка систем контроля и управления плавкой сплавов различных типов на основе изучения особенностей их кристал-



лизации и структурообразования. Иными словами, потребуется исследовать особенности структурообразования каждого типа сплавов, построить соответствующую математическую модель и вести плавку целенаправленно, задавая как получение матрицы, так и ту или иную форму и распределение вторых фаз данного сплава.

Будущее специальной электрометаллургии мы видим именно в реализации уникальных потенциальных возможностей целенаправленно воздействовать на структуру металла. Особенно важно это в связи с бурным ростом производства и применения нанокристаллических материалов. При этом важно учитывать, что любой сплав в принципе можно рассматривать как композитный материал и металлургам классического толка нужно готовить себя именно к такому восприятию конструкционных металлических материалов будущего. Сегодня же лишь для весьма ограниченного ряда сталей и сплавов мы можем гарантировать оптимальное сочетание служебных свойств именно из-за отсутствия технологических возможностей целенаправленного управления структурой. В ряду этих редких исключений, например, находятся металлы, проходящие термомеханическую обработку, включая контролируруемую прокатку, и многослойные металлы, в том числе и биметаллы. В свое время именно при работе с многослойными сталями сотрудники Института электросварки предложили рассматривать их как стали с заданной анизотропией структуры [5]. Сегодня нужно расширить этот подход и рас-

сматривать сплавы как материалы с заданной анизотропией свойств.

В заключение отметим, что и самые осторожные, и самые оптимистические прогнозы зачастую опровергаются действительностью. Тем не менее, мы рискуем предположить, что у специальной электрометаллургии — хорошее будущее. Основные же задачи, которые необходимо решать в этой подотрасли металлургии, будут связаны с материалами для энергетики и авиакосмической техники. А решение этих проблем будет лежать на пути комплексного применения различных технологий, как это делается сегодня при производстве суперсплавов последовательной вакуумно-индукционной плавкой, ЭШП и заключительным ВДП.

1. *Технология и оборудование, проблемы и перспективы бесконечной горячей прокатки на широкополосных станах* // О. В. Дубина, А. Л. Остапенко, Л. А. Никитина и др. // Бюллетень Черметинформации. — 2002. — № 5. — С. 10–31.
2. *Iverson K., Talk Plain. Lessons from business maverick.* — AISE, 1997. — 224 p.
3. *О жидкодиффузионном компактировании стали* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. Б. Медовар и др. // Докл. АН СССР. Техническая физика. — 1991. — 321, № 4. — С. 730–732.
4. *Цыкуленко К. А. Электрошлаковая наплавка жидким металлом* // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра». — Киев: ИВЦ «Вид-во "Політехніка"», 2002. — С. 118–122.
5. *Многослойная сталь в сварных конструкциях* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко и др. — Киев: Наук. думка, 1984. — 288 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 14.10.2002