



УДК 669.117.56

ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ СЛИТКОВ. ЖИДКИЙ МЕТАЛЛ ИЛИ РАСХОДУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОД*

К.А. Цыкуленко

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены основные технологические схемы электрошлаковой выплавки слитков — классическая и двухконтурная схемы переплава расходоуемого электрода, а также схема с заливкой жидкого металла в токоподводящий кристаллизатор. Отмечены проблемы, возникающие при использовании той или другой схемы, их преимущества и недостатки, в частности, подача металлического расплава в токоподводящий кристаллизатор и необходимость разработки соответствующих для этого устройств. С учетом требований к качеству металла и конечной стоимости электрошлакового слитка, в значительной степени обусловленной затратами на изготовление расходоуемых электродов, а также ценой оборудования в целом, высказано предположение о наиболее целесообразных областях применения каждой из технологических схем. Указано, для каких классов материалов и типоразмеров слитков рациональнее применять ту или иную технологию электрошлаковой выплавки. Отмечено, что для электрошлаковой выплавки крупных и сверхкрупных (100 т и более) слитков, а также длинномерных полых заготовок необходимо использовать технологические схемы с заливкой жидкого металла в токоподводящий кристаллизатор. При этом конструкция такой электрошлаковой печи, в отличие от уже существующих, может быть упрощена, а ее высота существенно снижена. Библиогр. 10

Ключевые слова: электрошлаковый переплав и выплавка слитков; расходоуемый электрод; двухконтурная схема переплава; токоподводящий кристаллизатор; заливка жидкого металла; качество металла; технологическая схема выплавки слитка; электрошлаковые печи

В настоящее время существует множество электрошлаковых технологий выплавки слитков. Применяемое для реализации того или иного электрошлакового процесса оборудование может существенно отличаться не только габаритными размерами и грузоподъемностью, но и комплектацией, типом и количеством необходимых устройств. Это не может не сказаться на конечной стоимости полученного электрошлакового слитка. При выборе технологической схемы выплавки, а следовательно, и комплекта необходимого оборудования прежде всего следует учитывать требуемые размеры слитка, химический состав сплава, из которого он будет изготовлен, и (что особенно важно) уровень требований, предъявляемых к качеству будущего слитка, прежде всего к металлургическому качеству металла.

С появлением таких технологических решений, как двухконтурная схема электрошлакового переплава расходоуемого электрода [1] и заливка жидкого металла [2] в токоподводящий кристаллизатор, возникла необходимость проанализировать их возможности, оценить преимущества перед ранее известными схемами переплава. Требуется также определить наиболее эффективные области применения указанных схем (для какого класса материалов и для какого типоразмера слитков рациональнее применить ту или иную технологическую схему электрошлаковой выплавки).

Классическая схема электрошлакового переплава расходоуемого электрода характеризуется рядом ограничений. Так, например, увеличение диаметра слитка, а следовательно, и глубины металлической ванны приводит к снижению металлургического качества металла; все большее развитие получают ликвационные процессы, появляются сегрегации, укрупняется структура. Именно поэтому для обеспечения требуемого уровня качества металла слитка при использовании сплава с широким температур-

* Данная статья представлена в соответствии с приглашением редколлегии журнала, опубликованном в № 1 за 2013, к обсуждению проблемы крупного слитка.



ным интервалом кристаллизации приходится уменьшать допустимый диаметр выплавляемого электрошлакового слитка, а для обеспечения требуемой массы слитка — увеличивать его высоту, что способствует увеличению габаритов установки, в первую очередь высоты колонны печи.

При классической схеме переплава расходоуемого электрода высота колонны печи ЭШП может превышать в 2...5 раз высоту слитка, получаемого на этой установке [3]. Поэтому печь для выплавки крупных и сверхкрупных (100 т и более) слитков может представлять собой довольно внушительную конструкцию высотой в несколько десятков метров. Кроме того, при переплаве длинномерных расходоуемых электродов эффективность короткой сети и коэффициент мощности печи снижаются.

Для уменьшения высоты установки можно использовать схему со встречным движением кристаллизатора и расходоуемого электрода, а также систему попеременной подачи электродов. Однако схема со встречным движением не предполагает автономности приводов тележек, что лишает печь гибкости. Смена расходоуемых электродов вызывает необходимость строгой регламентации времени их замены, усложнение процесса плавки и уменьшение эксплуатационной надежности печи, что особенно проявляется при увеличении диаметра электрода.

При производстве крупных и сверхкрупных слитков могут быть использованы уширенные (Т-образные) кристаллизаторы, когда сечение расходоуемых электродов близко к сечению получаемого слитка или превосходит его. Использование крупных массивных электродов позволит уменьшить высоту установки в целом, но с увеличением тоннажа выплавляемого слитка существенно возрастут нагрузки на механизм подачи расходоуемого электрода и колонну печи ЭШП. Кроме того, для переплава расходоуемых электродов большого диаметра потребуются существенно более мощные источники питания.

Уширенный кристаллизатор также может быть использован при выплавке полых заготовок. Однако при увеличении длины полый заготовки, когда способ электрошлаковой прошивки уже не может быть применен из-за увеличивающейся разностенности, необходимо использовать не один массивный электрод, а несколько значительно меньшего диаметра, установленных в зазоре между кристаллизатором (пусть даже и уширенным) и дорном. В результате этого коэффициент заполнения кристаллизатора снижается, а необходимая высота печи возрастает. Так, в работах [4–6] сообщалось о созданной в России печи ЭШП, представляющей внушительную порталную конструкцию высотой более 24 м. Сборку конструкции производили в горизонтальном положении, а для ее кантования и установки на опоры потребовалось применение специальной технологической оснастки и траверсы [4]. На такой печи могут быть получены полые заготовки длиной до 9,5 и диаметром до 960 мм. Кроме того,

при разработке конструкции печи предусмотрена возможность выплавки сверхкрупных сплошных слитков массой до 120 т, диаметром до 2000 мм [5].

Альтернативой подобным конструкциям печей ЭШП для выплавки длинномерных полых и сверхкрупных слитков могла бы служить конструкция печи, предусматривающая вместо переплава расходоуемых электродов заливку жидкого металла в токоподводящий кристаллизатор. При этом высота печи может быть существенно (примерно в два раза) снижена.

Возможность электрошлаковой выплавки слитков с использованием жидкого металла появилась благодаря разработке Институтом электросварки НАН Украины различных конструкций токоподводящих кристаллизаторов, как правило, состоящих из нескольких секций, при этом одни секции служат для кристаллизации металла и формирования слитка, а другие — для подвода требуемой электрической мощности к шлаковой ванне. Токоподводящие элементы такого кристаллизатора являются нерасходоуемыми электродами.

Основное преимущество технологической схемы выплавки слитков с заливкой жидкого металла в кристаллизатор состоит в управлении температурными параметрами процесса независимо от скорости поступления расплавленного металла на зеркало металлической ванны формируемого слитка, возможности в более широких пределах регулировать размер, а также форму металлической ванны, что позволит повысить качество металла слитка или увеличить его диаметр при сохранении прежнего уровня качества.

Основная проблема при использовании технологии выплавки слитка с заливкой жидкого металла в токоподводящий кристаллизатор заключается в отсутствии соответствующего оборудования для хранения и разлива жидкого металла с требуемой скоростью [7, 8]. В настоящее время подача жидкого расплава в токоподводящий кристаллизатор реализована в промышленности пока только с помощью магнитодинамических насосов [9]. Магнитодинамический насос, имеющий керамическую футеровку, накладывает определенные ограничения на температуру плавления стали. Таким образом, проблема подачи металлического расплава в токоподводящий кристаллизатор и разработка необходимых для этого устройств остаются по-прежнему актуальными. Необходимо отметить, что наиболее остро эта проблема ощущается при производстве слитков массой до 20...40 т, когда требуемые массовые скорости разлива составляют килограммы в час. При производстве крупных и сверхкрупных слитков массовая скорость разлива существенно возрастет. Предполагается, что в этом случае будет возможно (при условии некоторой модернизации) использовать уже существующие в металлургической промышленности устройства (миксеры, печи-ковши, качающиеся индукционные печи и другое оборудование).



Преимущество одной технологической схемы электрошлаковой выплавки слитка перед другой далеко неоднозначно. В общем случае необходимый для формирования слитка металлический расплав может быть получен, например, в конвертере или дуговой печи. Затем этот расплав используют при производстве заготовок, предназначенных для последующего передела, а затем переplava или непосредственно передают с помощью специальных устройств для заливки в токоподводящий кристаллизатор.

Заготовки, предназначенные для последующего передела, могут быть выполнены путем заливки металлического расплава в изложницы соответствующей конфигурации или разлиты на МНЛЗ. В свою очередь, литые заготовки, полученные в изложницах, можно использовать как для непосредственного изготовления расходных электродов, так и для дополнительных переделов —ковки и прокатки на крупносортовых станах. Однако любой дополнительный передел увеличивает стоимость расходного электрода. Так, электроды, полученные способом литья в изложницу, самые дешевые, далее идут электроды, произведенные на МНЛЗ, затем катаные и кованные.

Стоимость электрошлакового металла в значительной степени обусловлена затратами на изготовление расходных электродов, которые составляют 65...85 % общей стоимости выплавляемого слитка [10]. С учетом этого факта схема выплавки электрошлаковых слитков с заливкой жидкого металла непосредственно в кристаллизатор без трудоемкого и дорогостоящего процесса изготовления расходных электродов кажется весьма привлекательной. Однако не стоит забывать, что расходный электрод можно считать своеобразным устройством для хранения и получения требуемого количества жидкого металла. При этом обеспечивается защита разливаемого металла от вторичного окисления, что особенно актуально при выплавке слитков из сталей и сплавов, склонных к образованию флокенов, имеющих в своем составе легкоокисляющиеся элементы, например титан и алюминий.

Применение схемы выплавки электрошлакового слитка с использованием жидкого металла может быть целесообразно только в двух случаях: затраты, связанные с транспортировкой, хранением и заливкой жидкого металла в кристаллизатор не превышают затрат на изготовление расходных электродов, необходимых для выплавки слитка аналогичной массы; требуемое металлургическое качество металла слитка уже не может быть обеспечено с использованием классической схемы переplava расходного электрода, например при выплавке слитков диаметром 500 мм и более из суперсплава типа 718 Инконель.

Удельные затраты, связанные с хранением жидкого металла и обеспечением требуемой температуры заливки, по всей видимости, будут снижаться с увеличением массы. Кроме того, с повышением мас-

совой скорости разлики сократится время, необходимое для хранения в разливочном устройстве требуемой порции жидкой стали. Поэтому эффективность электрошлаковой выплавки с использованием жидкого металла будет повышаться с увеличением массы получаемого слитка. Наиболее целесообразно использовать эту технологию при выплавке крупных и сверхкрупных (100 т и более) слитков.

Для слитков, массой примерно 10...40 т, если затраты, связанные с хранением и разливкой жидкого металла могут быть соизмеримы или даже превышать затраты на изготовление расходных электродов, хорошим компромиссом между заливкой жидкого металла в токоподводящий кристаллизатор и переplавом расходного электрода в обычных (не токоподводящих) кристаллизаторах может служить двухконтурная схема переplava расходного электрода. В этой схеме предусматривается использование токоподводящего кристаллизатора в качестве элемента второго контура электрической цепи [1]. Расходные электроды служат источником жидкого металла, необходимого для выплавки слитка требуемой массы, а токоподводящий кристаллизатор обеспечивает возможность управлять температурными параметрами процесса плавки, влияя на скорость плавления электродов и форму металлической ванны.

Скорость плавления расходного электрода можно поддерживать как угодно малой, не нарушая при этом температурных условий формирования вытягиваемого из кристаллизатора слитка. Это позволяет получить такие параметры кристаллизации металлической ванны, которые предотвращают появление в металле слитков кристаллизационных дефектов, обусловленных ликвационными явлениями. Кроме того, использование двухконтурной схемы переplava дает возможность упростить и облегчить конструкцию колонны печи, поскольку эта схема позволяет без затруднений и нарушения условий формирования слитка производить смену расходных электродов.

Для слитков массой в несколько тонн и менее, по всей видимости, наиболее целесообразным будет применение классической схемы переplava расходного электрода. Такой вывод вытекает из указанных сложностей, связанных с хранением и заливкой с малой скоростью относительно небольших масс жидкого металла, отсутствием для этого соответствующих устройств. Применение двухконтурной схемы переplava для выплавки небольших слитков целесообразно лишь, когда классическая схема переplava не может обеспечить требуемый уровень качества металла. В остальных случаях с учетом существенного уменьшения габаритов печей при выплавке таких слитков нет необходимости производить смену электродов, использование токоподводящего кристаллизатора становится малоэффективным. Следует отметить, что применение токоподводящего кристаллизатора целесообразно



при электрошлаковой наплавке любых заготовок, в том числе и слитков указанной массы, когда требуется предварительно подготовить наплавляемую поверхность. Однако в рамках данной статьи процессы наплавки не рассматриваются.

Необходимо отметить, что для углеродистых и низколегированных сталей основной технологической схемой выплавки слитка следует считать классическую схему переплава расходоуемого электрода, а при больших диаметрах — двухконтурную. Для высоколегированных сталей и специальных сплавов, особенно имеющих в своем составе легкоокисляющиеся элементы, преобладающими технологическими схемами будут двухконтурная и схема с заливкой жидкого металла, потребность в использовании которых будет возрастать с увеличением диаметра слитка.

Выводы

1. Выбор схемы выплавки зависит прежде всего от диаметра будущего слитка, состава сплава и требований, предъявляемых к металлургическому качеству слитка.

2. Чем выше диаметр выплавляемого слитка, тем эффективнее использование токоподводящего кристаллизатора, а следовательно, и двухконтурной схемы переплава расходоуемого электрода и схемы с заливкой жидкого металла.

3. Необходимость применения технологических схем электрошлаковой выплавки слитка с использованием токоподводящего кристаллизатора возрастает с увеличением температурного интервала кристаллизации используемого сплава.

4. Для электрошлаковой выплавки крупных и сверхкрупных (100 т и более) слитков, а также длинномерных полых заготовок необходимо использовать технологические схемы с заливкой жидкого металла в токоподводящий кристаллизатор. При этом конструкция такой электрошлаковой печи, в отличие от уже существующих, может быть упрощена, а ее высота существенно снижена.

1. Цыкуленко А.К., Ланиман И.А., Медовар Л.Б. Двухконтурная схема электрошлакового переплава // Пробл. спецэлектрометаллургии. — 2000. — № 3. — С. 16–20.
2. Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Медовар Л.Б. Электрошлаковые процессы без расходоуемых электродов // Там же. — 1997. — № 2. — С. 12–16.
3. Электрошлаковые печи / Под ред. Б.Е.Патона и Б.И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1976. — 415 с.
4. Уникальная печь электрошлакового переплава устанавливается на Атоммаше // sdelanounas.ru/blogs/3374.
5. Универсальная двухмодульная печь электрошлакового переплава. — 2012. // www.ormeto-yumz.ru/...
6. Многоцелевая печь ЭШП для современного энергетического и тяжелого машиностроения / А.В. Дуб, В.С. Дуб, Ю.Н. Кригер и др. // Электрометаллургия. — 2011. — № 9. — С. 2–8.
7. Проблемы разлива жидкой стали с малой скоростью / А.К. Цыкуленко, Б.Б. Федоровский, В.Б. Смолярко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 3. — С. 9–14.
8. Цыкуленко К.А. Устройства для разлива жидкого металла. Требования к таким устройствам для ЭШП ЖМ // Пробл. спецэлектрометаллургии. — 2002. — № 2. — С. 12–14.
9. Применение магнитодинамической установки в технологии электрошлаковой наплавки жидким металлом стальных прокатных валков / В.И. Дубоделов, В.К. Погорский, В.К. Шнурко и др. // Современ. электрометаллургия. — 2002. — № 4. — С. 8–10.
10. Иванов И.Н., Воробьева Л.Ф., Бергауз Г.В. Экономика производства расходоуемых электродов для электрошлакового переплава // Пробл. спецэлектрометаллургии. — 1976. — № 4. — С. 69–71.

Main technological schemes of electroslag melting of ingots: classic and two-circuit schemes of remelting of consumable electrode, and also the scheme with pouring of liquid metal into a current-carrying mould were studied. The problems were outlined, occurring in application of these schemes, their advantages and drawbacks, in particular the feeding of metallic melt into the current-carrying mould and need in design of devices for this realizing. Taking into account the requirements to the metal quality and final cost of electroslag ingot, greatly depended on expenses for manufacture of consumable electrodes, as well as on cost of equipment as a whole, proposals were made about the most rational fields of application of each of the technological schemes. It was shown, which of technologies of electroslag melting is rational to apply for definite classes of materials and ingot types and sizes. It was noted, that for electroslag melting of large and super-large ingots (100 t and more), and also long hollow billets it is necessary to use the technological schemes with pouring of liquid metal into the current-carrying mould. In this case the design of such electroslag furnace, unlike the already existing furnaces, will be simplified, and its height will be greatly reduced. Ref. 10.

Key words: *electroslag remelting and melting of ingots; consumable electrode; two-circuit scheme of remelting; current-carrying mould; pouring of molten metal; metal quality; technological scheme of ingot melting; electroslag furnaces*

Поступила 26.03.2013