



УДК 669.187.58

ОХЛАЖДАЕМЫЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЛИТКОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА РАСПЛАВ

И. В. Шейко, В. А. Шаповалов,
В. В. Якуша, Ю. А. Никитенко, Д. М. Жиров

Рассмотрены особенности индукционной плавки в секционном кристаллизаторе и передачи энергии высокочастотного электромагнитного поля от индуктора к металлической ванне. Показано, что секционные кристаллизаторы представляют собой весьма сложные в конструктивном отношении агрегаты, функциональные возможности которых значительно шире, чем у кристаллизаторов традиционной конструкции. Они участвуют не только в формообразовании слитка, но и в передаче энергии электромагнитного поля от индуктора или другой электромагнитной системы к расплаву, что в ряде случаев повышает технико-экономические показатели переплавных процессов (например, ЭЛП и ЭШП) и качественные характеристики выплавленного металла. Степень передачи энергии в металлическую ванну в значительной мере зависит от конструкции водоохлаждаемых секций.

Peculiarities of induction melting in a sectional mould and transmission of energy of high-frequency electromagnetic field from inductor to metal pool are considered. It is shown that the sectional moulds represent units of a complicated design, the functional capabilities of which are much wider than in moulds of a traditional design. They effect not only on the ingot formation, but also on transmission of electromagnetic field energy from inductor or other electromagnetic system to the melt, thus increasing in some cases the technical-economic characteristics of remelting processes (for example EBR and ESR) and quality characteristics of the produced metal. The degree of energy transmission into metal pool depends to a large extent on the design of water-cooled sections.

Ключевые слова: секционный кристаллизатор; индуктор; поддон; загрузка; металлическая ванна; расходующая заготовка; электромагнитное поле

В современных переплавных способах, основанных на применении электрических источников нагрева (вакуумно-дуговой — ВДП, электрошлаковый — ЭШП, электронно-лучевой — ЭЛП и плазменно-дуговой переплавы — ПДП) формирование слитка во время плавки происходит в медном охлаждаемом кристаллизаторе. Конструктивные решения этих устройств весьма разнообразны и определяются особенностями того или иного процесса.

Так, большинство кристаллизаторов для ВДП и ЭШП представляют собой водоохлаждаемую изложницу, у которой формирующая гильза выполнена из меди и помещена в стальную обечайку (рубашку). В кольцевой зазор между гильзой и обечайкой подается охлаждающая вода. Высота (длина) таких кристаллизаторов, как правило, превы-

шает длину слитка, поскольку слиток наплавляется путем переплава расходующего электрода непосредственно в кристаллизаторе [1–3].

Формирование слитков в печах ЭЛП и ПДП происходит в результате переплава расходующих заготовок, которые размещают над кристаллизатором, а слиток в процессе плавки вытягивают из кристаллизатора. Высота такого кристаллизатора, как правило, не превышает диаметра выплавленного слитка, поскольку во время плавки в кристаллизаторе располагается металлическая ванна, а слиток находится ниже кристаллизатора [2, 4–7].

Во второй половине прошлого века заметное развитие за рубежом и у нас в стране получили способы индукционной плавки высокореакционных металлов, в которых вместо тигля из огнеупорного материала используются так называемые холодные тигли или охлаждаемые секционные кристаллизаторы. Эти процессы известны как индукционная плавка



в холодном тигле (ИПХТ) и индукционный переплав в секционном кристаллизаторе (ИПСК) [8–15].

Источником тепловой энергии при ИПСК является электромагнитное поле, создаваемое переменным током, протекающим в индукторе. Условия передачи энергии электромагнитного поля при ИПСК отличаются от таковых обычной индукционной плавки, поскольку между индуктором и загрузкой находится стенка секционного кристаллизатора.

В отличие от других переплавных процессов (ВДП, ЭШП, ЭЛП и ПДП), в которых формирование слитка также происходит в охлаждаемом кристаллизаторе и он является только конструктивным элементом, формирующим слиток, при ИПСК кристаллизатор служит еще и электроэнергетическим звеном в электрической силовой цепи. Таким образом, от конструкции секционного кристаллизатора зависит не только качество выплавляемого слитка, но и электроэнергетические показатели процесса.

Во внутреннем объеме кристаллизатора вследствие протекания индуцированных токов в секциях создается электромагнитное поле. Кроме того, через зазоры между секциями проникает электромагнитное поле, создаваемое током индуктора. Поэтому суммарное электромагнитное поле весьма неоднородно. В зоне, расположенной напротив стыков секций, напряженность электромагнитного поля значительно выше, чем в зонах напротив секций.

Экспериментально установлено, что путь протекания тока, индуцированного в секциях, зависит от конструкции секций. В поперечном сечении каждая секция имеет четыре стенки со своим функциональным назначением.

Так, в наружной стенке, обращенной к индуктору, происходит наведение тока, создаваемого электромагнитным полем индуктора. Ток, протекающий по внутренней стенке секции (обращенной к загрузке), индуцирует токи в поверхностном слое загрузки, и поэтому внутренняя стенка секции служит индуктором для загрузки. Радиальные стенки секции являются токоподводами, обеспечивающими подвод тока к внутренним стенкам секций. Таким образом, для сокращения электрических потерь в кристаллизаторе необходимо уменьшать длину радиальных (боковых) стенок секций.

При одинаковой толщине стенок секций, что характерно для секций, изготовленных из профилированной медной трубки (рис. 1, а), индуцированный кольцевой ток протекает равномерно по толщине стенки. Если толщина стенки секции неодинакова, что имеет место в случае сверленных каналов для протока охлаждающей воды (рис. 1, б), то кольцевые токи протекают по кратчайшему пути. В результате, они огибают края у стыков радиальных и внутренней стенки, что способствует образованию краевых «мертвых» зон с обеих сторон внутренней стенки. Это приводит к уменьшению длины индуцирующей части внутренней стенки секции, особенно при работе на токах средней и низкой частоты (2,5... 8,0 кГц и меньше), поскольку с умень-

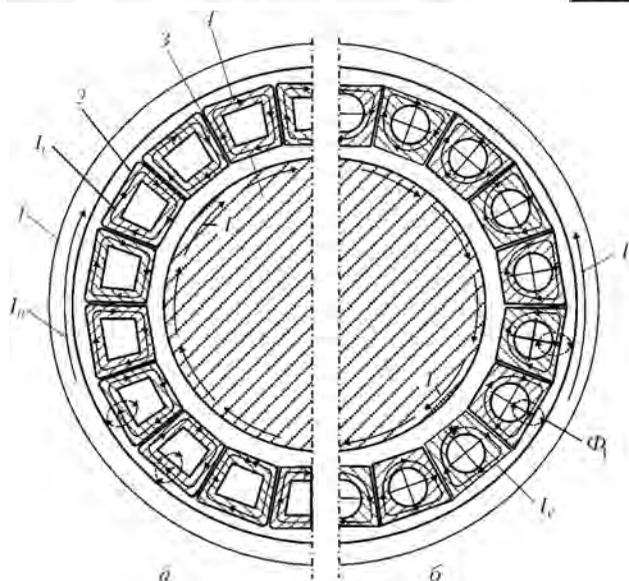


Рис. 1. Схема протекания токов в элементах системы индуктор–кристаллизатор–загрузка в зависимости от толщины стенки секции кристаллизатора: а – одинаковая по периметру; б – различная по периметру; 1 – индуктор; 2 – секции кристаллизатора; 3 – диэлектрическая прокладка; 4 – загрузка; I_2 – ток, индуцированный в поверхностном слое загрузки; I_3 – ток, индуцированный в секции; I_4 – ток индуктора; Φ_1 – магнитный поток секции

шением частоты электрического тока поверхностный эффект значительно снижается и тепловыделение в загрузке заметно падает, а следовательно, уменьшается электрический КПД системы индуктор–кристаллизатор–загрузка.

Экспериментально установлено, что в макете загрузки, размещенной в секционном кристаллизаторе, секции которого изготовлены из профилированной медной трубки, на частоте рабочего тока 2,4 кГц выделяется в среднем 36... 40 % тепловой энергии. В том же макете загрузки, установленной в кристаллизатор, секции которого имеют сверленные каналы для протока охлаждающей воды, выделяется всего 27... 32 % тепловой энергии, т. е. на 8... 12 % меньше.

По принципу формирования слитка секционные кристаллизаторы можно разделить на две группы: кристаллизаторы-изложницы, в которых слиток получают без его перемещения в ходе плавки относительно стенок кристаллизатора; кристаллизаторы, из которых при плавке слиток вытягивают с помощью специального механизма (кристаллизаторы скольжения).

Каждая из этих схем широко применяется на практике и имеет как преимущества, так недостатки. Основным достоинством выплавки слитков в кристаллизаторе-изложнице является отсутствие перемещения слитка относительно стенки кристаллизатора во время плавки. В этом случае кристаллизатор и слиток не испытывают механических нагрузок, вызванных трением слитка о формирующую стенку кристаллизатора, что существенно повышает ресурс работы кристаллизатора. Кроме того, исключается образование трещин в слитке из металлов и сплавов, имеющих низкую пластичность даже при высоких температурах.

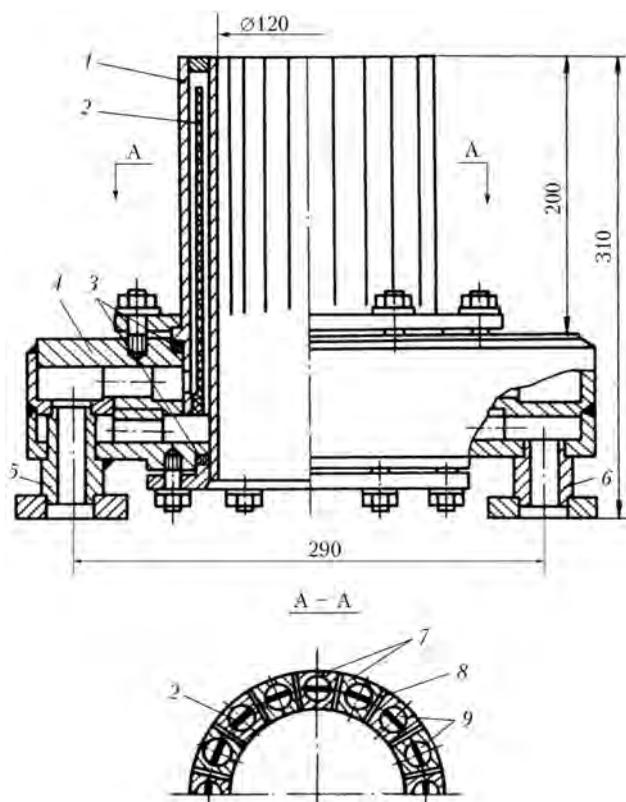


Рис. 2. Конструкция секционного (скользящего) кристаллизатора для индукционной выплавки слитков с вытягиванием их во время плавки: 1 – формирующая гильза; 2 – дефлектор; 3 – уплотнительные кольца; 4 – водяной коллектор; 5 – патрубок для подвода охлаждающей воды; 6 – патрубок для отвода воды; 7 – секции; 8 – диэлектрические прокладки; 9 – каналы для протока воды

Недостаток этой схемы заключается в большой металлоемкости секционного кристаллизатора, сложной технологии его изготовления и, соответственно, высокой стоимости.

К преимуществам схемы с вытягиванием слитка следует отнести небольшие металлоемкость и стоимость секционных кристаллизаторов, поскольку общая высота формирующей гильзы, как правило, не превышает два диаметра слитка. Основным недостатком этой схемы является невозможность выплавки слитков из металлов и сплавов, имеющих малую пластичность, и поэтому в процессе вытягивания не исключено образование поперечных трещин, а иногда происходит и разрыв слитков.

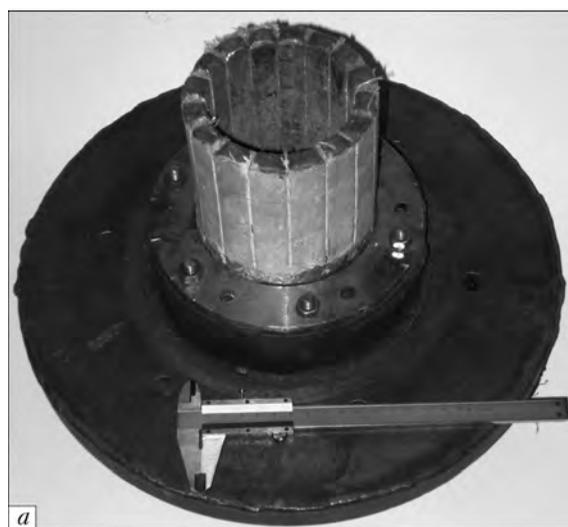


Рис. 3. Секционный скользящий кристаллизатор диаметром 80 мм для ИПСК: а – общий вид; б – формирующая секционная гильза

Кристаллизаторы для индукционной выплавки слитков путем их вытягивания представляют собой конструкцию, состоящую из медной секционированной гильзы и водяного коллектора (рис. 2, 3). Основные технические характеристики кристаллизаторов приведены в табл. 1.

Формирующая секционная гильза изготавливается из толстостенной медной трубы (толщина стенки от 25 мм и более) путем фрезерования в ней ради-

Таблица 1. Технические характеристики кристаллизаторов скольжения для ИПСК

$D_{\text{вн.кр}}$	$D_{\text{н.кр}}$	Высота рабочей части гильзы, мм	Количество секций, шт.	Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	Особенности конструкции
мм					
55	85	70	12	0,8...1,2	Каналы для воды сверленные диаметром 10 мм
68	98	80	12	0,8...1,2	Каналы для воды фрезерованные размером 8×8 мм
80	110	95	14	1,0...1,5	Каналы для воды сверленные диаметром 10 мм
100	135	120	16	1,5...2,0	Каналы для воды фрезерованные размером 10×8 мм
150	185	175	16	2,0...2,5	Каналы для воды сверленные диаметром 12 мм

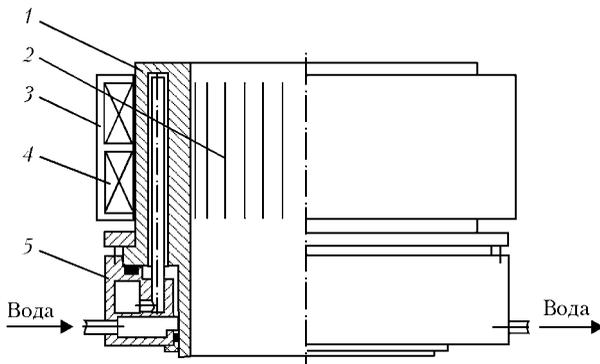


Рис. 4. Принципиальная схема кристаллизатора для ЭЛП с системой электромагнитного перемешивания [16]: 1 – водоохлаждаемая медная гильза; 2 – разрезы в зоне размещения катушек; 3 – магнитопровод; 4 – электромагнитная катушка; 5 – водяной коллектор

альных прорезей, образующих продольные секции. Для обеспечения электрической изоляции секций в зоне индуктора устанавливают тонкие диэлектрические полоски из термостойкого материала. Чаще всего для этого используют стеклоткань. Далее производят обжатие гильзы при помощи специальных хомутов, и стеклоткань механически зажимается между секциями, обеспечивая их электроизоляцию.

Каналы для потока охлаждающей воды в секциях выполняют путем сверления или фрезерования. Первый способ технологически проще, однако в этом случае секции имеют переменную толщину стенок, что приводит к снижению передаваемой в загрузку энергии.

Фрезерование каналов для потока воды обеспечивает одинаковую толщину стенок секций по сечению. Поэтому несмотря на более сложную технологию изготовления гильзы это экономически оправдано, поскольку КПД такого кристаллизатора выше. Формирующую поверхность гильзы после опрессовки можно обработать на токарном станке или шлифовать, что позволяет уменьшить усилие трения слитка при вытягивании.

Формирующую гильзу кристаллизатора следует изготавливать из деформированного металла. Применение заготовок из литого металла нежелательно, поскольку в нем возможно наличие микропор и газовых раковин, которые могут стать причиной прожога кристаллизатора во время плавки. Для разделения потоков воды в каналах секций в каждой из них устанавливают перегородки. Материал перегородок должен быть неэлектропроводным во избежание перетока индуцированных токов в секциях.

Формирующую гильзу устанавливают в водяном коллекторе, а герметичность соединения гильзы с коллектором обеспечивают путем использования уплотнительных резиновых колец. Равномерность водяного потока от коллектора к гильзе создают за счет множества отверстий, выполненных в коллекторе.

Кристаллизаторы аналогичной конструкции в последние годы нашли применение в литейных плавильных установках для электронно-лучевой плавки (рис. 4). Они позволяют в процессе плавки осу-

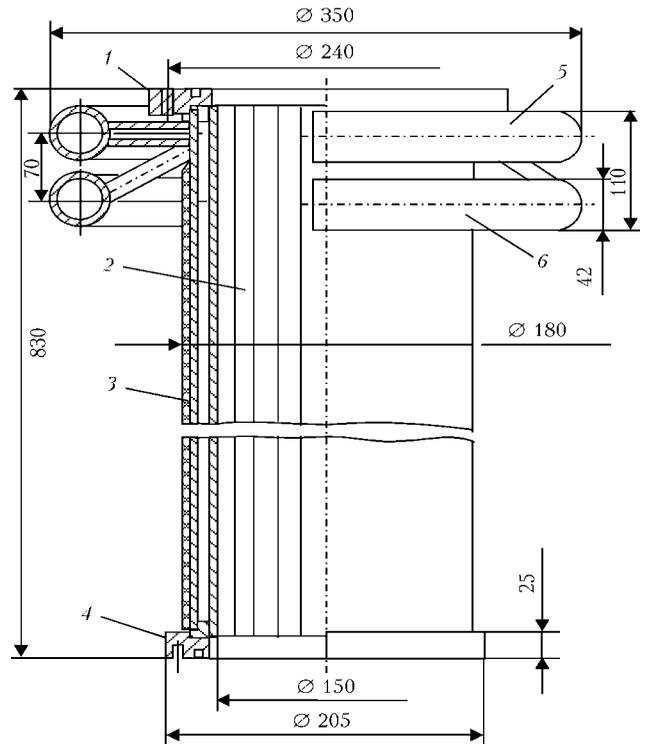


Рис. 5. Конструкция секционного кристаллизатора-изложницы диаметром 200 мм для выплавки слитков способом ИПСК (плавильная установка ОП-151): 1 – верхний фланец; 2 – секции из профилированной медной трубки; 3 – герметичная оболочка из стеклоткань; 4 – нижний фланец; 5 – напорный водяной коллектор; 6 – сливной водяной коллектор

ществлять перемешивание металлической ванны благодаря электромагнитным катушкам, питающимся от сети переменного тока.

Медная водоохлаждаемая гильза таких кристаллизаторов в зоне катушек имеет вертикальные радиальные прорезы, делящие гильзу на секции. Благодаря этим прорезам электромагнитное поле, создаваемое катушками, проникает во внутренний объем кристаллизатора и вызывает перемешивание металлической ванны.

Вследствие электромагнитного перемешивания при ЭЛП удельный расход электроэнергии сокращается почти вдвое, уменьшается продолжительность плавки и возрастает слив металла [16].

Другой разновидностью секционных кристаллизаторов для ИПСК являются кристаллизаторы-изложницы, представляющие собой более металлоемкую конструкцию, чем кристаллизаторы скольжения, поскольку они длиннее, чем выплавляемые слитки. Формирующая гильза таких кристаллизаторов собирается из профилированной медной трубки, имеющей в сечении трапециевидную форму (рис. 5). Применение профилированных трубок существенно упрощает технологию производства секций. Однако при толщине стенки более 2,0... 2,5 мм, необходимой для кристаллизаторов, рассчитанных на выплавку крупных слитков, возникают трудности с профилированием трубок.

Секции крупных кристаллизаторов необходимо изготавливать с применением фрезерования длинномерных медных прутков для придания им трапеци-

Таблица 2. Техническая характеристика кристаллизаторов-изложниц для ИПСК

$D_{кр}$, мм	Общая высота, мм	Количество секций, шт.	Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	Особенности конструкции
60	400	16	1,0... 1,5	Водяной коллектор разборной
80	400	20	1,0... 1,8	То же
160	370	24	2,2... 2,8	»
225	800	24	2,5... 3,2	Водяной коллектор из кольцевых трубок
300	610	28	3,0... 4,0	Водяной коллектор разборной

евидной формы снаружи и получения внутренних каналов для протока воды.

Электрическая изоляция секций обеспечивается путем нанесения на боковые сопрягаемые стенки оксида алюминия при помощи газотермического напыления либо наклеивания ленты из стеклоткани. К торцам гильзы с обеих сторон приваривают по фланцу, что позволяет крепить кристаллизатор верхним фланцем к плавильной камере или бункеру установки, а к нижнему — присоединять поддон. Технические характеристики кристаллизаторов этого типа приведены в табл. 2.

Водяные коллекторы первых кристаллизаторов были изготовлены из труб, согнутых в кольца, которые охватывали гильзу по периметру (рис. 5). Подвод и отвод воды к секциям осуществлялся при помощи медных штуцеров, присоединенных радиально между секциями и коллекторами.

В дальнейшем конструкция водяных коллекторов претерпела изменения, и водоснабжение секций происходит без применения радиальных штуцеров, а сами коллекторы выполняют разборными (рис. 6, а). Это существенно упростило обслуживание кристаллизаторов, внешний вид стал более эстетичным (рис. 6, б).

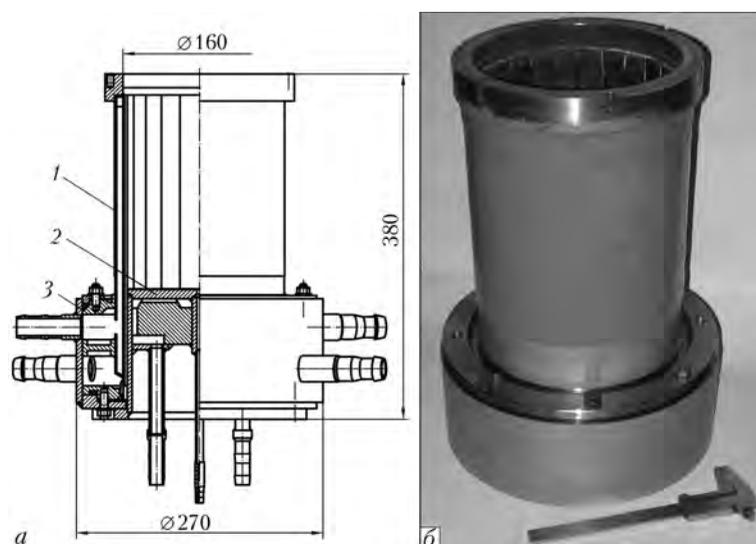


Рис. 6. Секционный кристаллизатор с разборным водяным коллектором: а — в разрезе; б — общий вид; 1 — секционная гильза; 2 — поддон; 3 — водяной коллектор

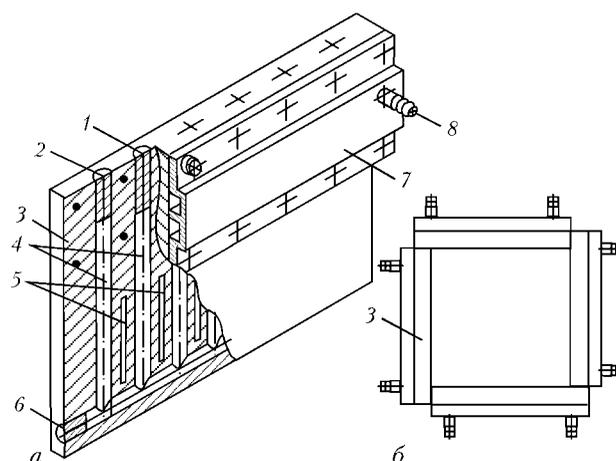


Рис. 7. Конструкция секционной панели сборного кристаллизатора: а — в разрезе; б — схема сборки кристаллизатора; 1, 2, 6 — заглушки; 3 — медная панель; 4 — каналы для протока охлаждающей воды; 5 — межсекционные прорезы; 7 — водяной коллектор; 8 — штуцер

Для герметизации рабочего объема кристаллизатора его гильзу по всей высоте покрывают оболочкой из стеклоткани толщиной 3,0... 3,5 мм, которую получают путем послойной намотки стеклоткани с пропиткой каждого слоя эпоксидным клеем. Оболочка из стеклоткани придает кристаллизатору дополнительную конструктивную жесткость и прочность.

Кристаллизаторы аналогичной конструкции находят применение в процессах магнитоуправляемой ЭШП при выплавке высокорекреционных металлов и сплавов [17]. Как и в случае ЭЛП, электромагнитное поле, создаваемое переменным током в катушке, охватывающей секционированную гильзу кристаллизатора по периметру, проникает во внутренний объем кристаллизатора и вызывает перемешивание металлической ванны. Это способствует усреднению химического состава металла в объеме металлической ванны и измельчению зерен при кристаллизации слитка.

В последние годы индукционная плавка в секционном кристаллизаторе широко применяется при производстве слитков кремния для солнечной энергетики [18–22]. Во Франции (фирма «Emix») и Японии (фирма «Sumko Solar Corporation») работают индукционные плавильные установки, которые позволяют выплавлять крупные слитки мульткристаллического кремния сечением 400×400 мм и длиной в несколько метров.

Выплавка этих слитков производится в составных панельных кристаллизаторах. На рис. 7 приведена одна из конструкций секционной охлаждаемой панели, используемой для сборки такого кристаллизатора. Панель в зоне индуктора разделена прорезями на вертикальные секции, в каждой из которых имеется канал для протока охлаждающей воды. Все панели имеют по водяному коллектору и



поэтому из них достаточно просто собирать кристаллизатор заданной конфигурации, в данном случае квадратной формы. Кристаллизатор работает в герметичной плавильной камере установки.

Таким образом, секционные кристаллизаторы представляют собой весьма сложные в конструктивном отношении агрегаты, функциональные возможности которых значительно шире, чем у кристаллизаторов традиционной конструкции. Они участвуют не только в формообразовании слитка, но и в передаче энергии электромагнитного поля от индуктора или другой электромагнитной системы к расплаву, что в ряде случаев повышает технико-экономические показатели переплавных процессов (например ЭЛП и ЭШП), а также качественные характеристики выплавленного металла. Поэтому область применения этих агрегатов с каждым годом расширяется.

1. *Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов. — 2-е изд. / А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердев, А. М. Кручинин и др. — М.: Энергоиздат, 1981. — 296 с.*
2. *Сатко А.И. Механическое оборудование цехов спецэлектротехнологии. — М.: Металлургия, 1983. — 200 с.*
3. *Электродуговые печи / Б. И. Медвар, Л. М. Ступак, Г. А. Бойко и др. — Киев: Наук. думка, 1976. — 414 с.*
4. *Патон Б. Е., Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л. Анализ современных способов плавки и рафинирования металла в электронно-лучевых печах // Рафинирующие переплавы: Сб. ст. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 179–195.*
5. *Мовчан Б. А. Электронно-лучевая плавка и испарение в современных металлургии и машиностроении // Сварка и специальная электротехнология. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 259–264.*
6. *Плазменно-дуговой переплав металлов и сплавов / Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, Д. А. Дудко и др. // Автомат. сварка. — 1966. — № 8. — С. 1–5.*
7. *Бортничук Н. И., Крутянский М. М. Плазменно-дуговые плавильные печи. — М.: Энергоиздат, 1981. — 120 с.*
8. *Shippereit G. H., Leatherman A. F., Everts D. S. Cold-crucible induction melting of reactive metals // J. of Metals. — 1961. — № 2. — P. 140–143.*
9. *Clites P. G., Beall R. A. Induction-slag melting of titanium. Kept. Investing. Bur. Mines // U.S. Dept. Interior. — 1969. — № 7268. — P. 1–20.*
10. *Качур Л. И. Индукционная печь с секционированным тиглем для плавки металлов и сплавов // Научно-технические достижения. ВНИИМИ: Сб. тр. — М., 1987. — С. 65–68.*
11. *Фомин Н. И. Определение параметров системы индуктор-тигель-садка в индукционных печах с холодным тиглем // Исследование в области промышленного электронагрева: Труды ВНИИЭТО. — М.: Энергия, 1981. — Вып. 7. — С. 65–71.*
12. *Гир Л. Л., Чайкин П. М., Никольский Л. Е. Индукционные плавильные печи с холодным тиглем // Электротермия. — 1968. — Вып. 73–74. — С. 68–71.*
13. *Индукционный переплав в секционном кристаллизаторе, возможности и перспективы применения его для переплава титановых отходов / Ю. В. Латаш, И. В. Шейко, В. Н. Бернадский и др. // Пробл. спец. электротехнологии. — 1986. — № 2. — С. 64–70.*
14. *Дистилляционное рафинирование черновое иттрия при индукционном переплаве в секционном кристаллизаторе (ИПСК) / И. В. Шейко, Ю. В. Латаш, Г. А. Высоцкий и др. // Там же. — 1991. — № 3. — С. 76–80.*
15. *Sheiko I. V., Latash Yu. V. Induction Melting with an Ingot Formation in a Sectional Mould / Ed. by Institute E. O. Paton. — London, 1999. — 11, № 4. — 99 p.*
16. *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / С. В. Ладохин, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский и др. — Киев: Сталь, 2007. — 627 с.*
17. *Протоколов І. В. Магнітокервана електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: Дис. ... канд. техн. наук / НАН України, Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона. — Київ, 2006. — 178 с.*
18. *Басин А. С., Шишкин А. В. Получение кремниевых пластин для солнечной энергетики. Методы и технологии. — Новосибирск: ИТ СЦ РАН, 2000. — 196 с.*
19. *Абдюханов И. М. Разработка основ технологии производства металлургического кремния повышенной чистоты для наземной фотоэнергетики // Рос. хим. ж-л. — 2001. — 45, № 5-6. — С. 107–111.*
20. *Солнечная энергетика и возможности индукционной гарнисажной плавки в холодном тигле для получения солнечного кремния / А. В. Шкульков, Ю. В. Черпак, С. А. Позирый и др. // Индукционный нагрев. — 2009. — № 3. — С. 16–19.*
21. *Kaneko K., Misava T., Tabata K. Cold crucible induction casting of semiconductor silicon for solar cells // Photovoltaic Specialists conf. (21–25 May 1990, Kissimmee, FL, USA). — Kissimmee, 1990. — Vol. 1. — P. 674–677.*
22. *Continuous pulling of photovoltaic silicon using an inductive cold crucible / P. Ribeyron, A. Gagnoud, M. Anderhuber et al. // Proc. Intern. conf. Electromagnetic Processing of Materials UIE/EPM (June 6, Paris, 1997). — Paris, 1997. — Vol. 2. — P. 303–308.*

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

Поступила 30.09.2011

Международная конференция «Ti-2012 в СНГ»

22–25 апреля 2012, г. Казань, Россия

18 ноября 2011 г. состоялось заседание Совета директоров ЗАО «Межгосударственная ассоциация «Титан».

Собрание проходило в ФГУП ВИАМ, г. Москва. Были рассмотрены вопросы текущей деятельности ассоциации, а также принято решение о проведении очередной ежегодной международной конференции «Ti-2012 в СНГ» с 22 по 25 апреля 2012 г. в г. Казань.

<http://www.titan-association.com>