

УДК 669.117.56

ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА В СЕКЦИОННОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ, ЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ

И. В. Шейко, В. А. Шаповалов, В. В. Якуша

Рассмотрены особенности процесса плавки в секционном кристаллизаторе с использованием индукционного источника нагрева, возможные способы накопления жидкого металла в секционном кристаллизаторе и его разливки. Показаны пути интенсификации плавки и перегрева жидкого металла, а также возможный сортамент отливаемых изделий.

Ключевые слова: индуктор; электромагнитное поле; жидкий металл; металлическая ванна; секционный кристаллизатор; литейная форма; отливка

Индукционный нагрев довольно широко применяется в различных областях техники, в том числе и в металлургии, для термообработки, выращивания монокристаллов, плавки металлов и сплавов благодаря комплексу таких уникальных технологических свойств, характеризующих индукционный источник нагрева:

отсутствие негативного влияния на состав и свойства нагреваемых материалов;

интенсивное перемешивание жидкого металла во время плавки позволяет обеспечивать выравнивание температуры и химического состава в объеме ванны;

отсутствие локального перегрева металла способствует обеспечению незначительного угара легирующих элементов;

отсутствие жесткой связи между подводимой электрической мощностью и скоростью плавки дает возможность выдерживать металлический расплав в жидком состоянии длительное время и управлять кристаллизацией металла;

не требуется создание каких-либо специальных условий для работы, поэтому технологический процесс можно вести в газовой атмосфере любого состава и давления, в том числе и в вакууме;

обеспечивает высокую надежность работы источника нагрева благодаря отсутствию в нем расходных элементов, например электродов.

Однако в существующих плавильных печах отмеченные достоинства индукционного источника нагрева реализуются не в полной мере, поскольку во время плавки жидкий металл контактирует с огнеупорной стенкой тигля и загрязняется продуктами реакции взаимодействия (неметаллическими и газовыми примесями). Интенсивное перемешивание расплава в данном случае ускоряет этот процесс.

Это, безусловно, ограничивает применение индукционных печей для плавки и рафинирования высокореакционных металлов и сплавов, например титана, его сплавов, РЗМ и т. д.

Прогрессивным способом выплавки слитков с использованием индукционного источника нагрева является индукционный переплав в секционном кристаллизаторе (ИПСК), разработанный в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины [1–3]. Данный процесс (рис. 1) заключается в том, что в секционном кристаллизаторе, стенка которого «прозрачна» для электромагнитного поля, создают высокочастотное электромагнитное поле, где наводят металлическую ванну путем расплавления кусковой шихты или монолитной затравки. Дальнейшее наплавление слитка производится рас-

© И. В. ШЕЙКО, В. А. ШАПОВАЛОВ, В. В. ЯКУША, 2008

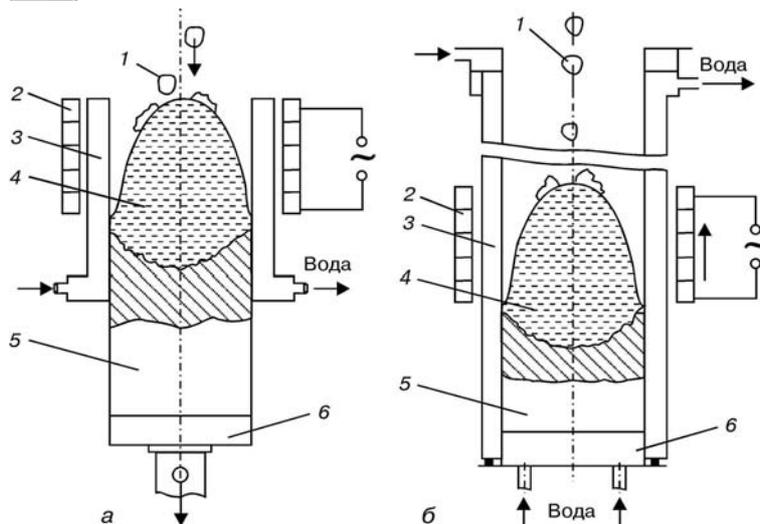


Рис. 1. Принципиальные схемы ИПСК: *a* — выплавка слитка вытягиванием из кристаллизатора; *б* — выплавка слитка наплавлением в кристаллизаторе; 1 — шихта; 2 — индуктор; 3 — секционный кристаллизатор; 4 — металлическая ванна; 5 — слиток; 6 — поддон

плавлением кусковой шихты, которую подают в металлическую ванну порционно. При этом объем металлической ванны в процессе плавки сохраняется неизменным, а слиток вытягивают из кристаллизатора или наплавляют в кристаллизаторе, для чего индуктор, а следовательно, и металлическую ванну, перемещают снизу вверх. Таким образом, процесс четко ориентирован на выплавку слитков, внешняя конфигурация которых зависит от формы кристаллизатора (цилиндрический, прямоугольный и т. д.).

Для ИПСК характерно то, что высота индуктора не превышает высоту внутреннего диаметра кристаллизатора ($h_{\text{инд}} \leq D_{\text{кр}}$, где $h_{\text{инд}}$ — высота индуктора, $D_{\text{кр}}$ — диаметр кристаллизатора). В этом случае оптимальный объем металлической ванны $V_{\text{м.в}}$ в свою очередь связан с частотой тока в индукторе, диаметром кристаллизатора и составляет 0,6 объема кристаллизатора, ограниченного высотой индуктора, т. е. [1]

$$V_{\text{м.в}} \approx 0,15\pi D_{\text{кр}}^2 h_{\text{инд}} \approx 0,15D_{\text{кр}}^2 h_{\text{инд}}$$

Из приведенного соотношения следует, что объем жидкого металла, накопленного в кристаллизаторе, зависит от его диаметра и высоты индуктора. Меньший объем металлической ванны, по сравнению с объемом кристаллизатора, ограниченного высотой индуктора, объясняется отжатием металлического расплава от стенки кристаллизатора электромагнитным полем, создаваемым током индуктора (рис. 2).

Этого объема металлической ванны вполне достаточно для формирования слитка с качественной внешней поверхностью и кристаллической структурой (рис. 3). Однако ИПСК позволяет получать слитки преимущественно круглого, прямоугольного или квадратного сечения.

Другим интересным направлением, в котором используют индукционный нагрев при отсутствии контакта жидкого металла с огнеупорными материалами, является плавка в холодном тигле [4–7], отличающаяся от обычной тигельной индукционной условиями передачи энергии от индуктора к расплаву, поскольку между индуктором и металлическим расплавом находится стенка холодного тигля, искажающая электромагнитное поле, создаваемое током в индукторе.

Сплошная металлическая стенка обычного охлаждаемого тигля является экраном для высокочастотного электромагнитного поля, создаваемого индуктором, поскольку вихревые токи, индуцируемые в стенке тигля, образуют замкнутую электрическую



Рис. 2. Выпуклый мениск металлической ванны при ИПСК титана ($D_{\text{кр}} = 70$ мм; $f = 66$ кГц)

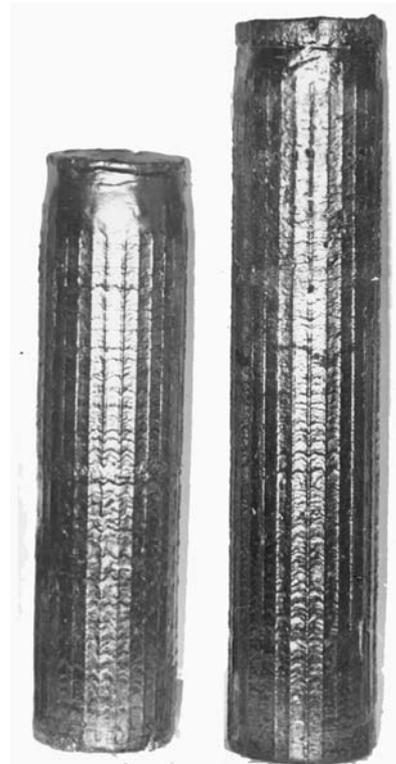


Рис. 3. Внешний вид титановых слитков диаметром 100 мм



цепь по наружной поверхности его стенки. Стенка холодного тигля, выполненная из отдельных электрически изолированных охлаждаемых секций, представляет собой вторичную обмотку трансформатора. Благодаря этому происходит передача энергии электромагнитного поля от индуктора к расплаву в холодном тигле [4, 6, 7].

Несмотря на то, что часть энергии электромагнитного поля теряется в охлаждаемой стенке тигля, весьма высокое значение коэффициента мощности цилиндрического индуктора (по сравнению с торцевым) обеспечивает выделение тепловой энергии в шихте, достаточное для ее расплавления и последующего перегрева металлического расплава. Равномерный боковой нагрев и интенсивное перемешивание расплава в электромагнитном поле позволяют получить ванну с однородными химическим составом и температурой.

При индукционной плавке в холодном тигле его геометрические параметры близки к таковым тиглей из огнеупорных материалов, применяемых в обычных индукционных печах, т. е. высота тигля и индуктора в 2...3 раза превышает диаметр тигля. Поэтому для индукционной плавки в холодном тигле характерна большая глубина металлической ванны. По высоте металлической ванны, находящейся в холодном тигле, можно выделить три характерные зоны (рис. 4) [8]. Верхняя *I* — зона полного отжигания расплава от стенки холодного тигля, средняя *II* — зона частичного (щелевого) отжигания расплава от стенки тигля и нижняя *III* — зона полного контакта расплава со стенкой холодного тигля.

В этом направлении усилиями многих научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов бывшего Советского Союза (ВНИИЭТО, ВНИИТВЧ, НИАТ, ИМЕТ, ВИАМ, НПО «Сатурн» им. А. И. Льюльки и др.) разработан и освоен в режиме полупромышленной эксплуатации ряд индукционных литейных печей с холодными тиглями вместимостью от 5 до 100 кг (по титану). На этих агрегатах отработаны энергетические режимы выплавки преимущественно титана и его сплавов, определены энергетические, тепловые и технико-экономические показатели работы этих агрегатов, установлены основные параметры и требования к источникам питания, выбору частоты тока и др.

Литейные установки этого типа (с холодным тиглем) представляют собой вакуумную или газонаполненную камеру, внутри которой установлены водоохлаждаемый секционный тигель с индуктором и площадка или карусель для размещения литейных форм или изложниц.

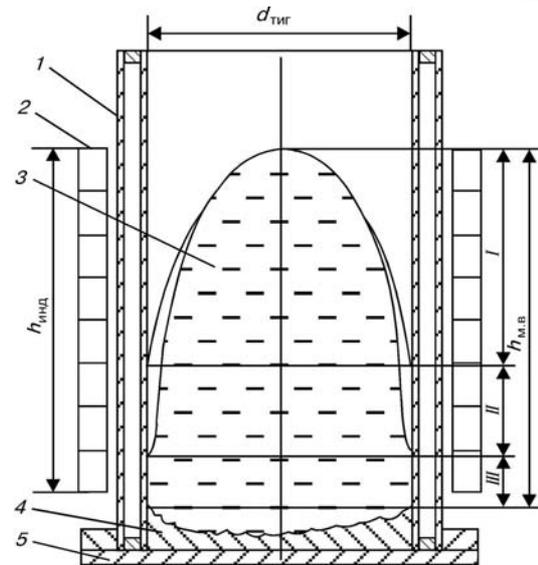


Рис. 4. Характерные зоны металлической ванны при плавке в холодном тигле: *I* — полного отжигания расплава от стенки тигля; *II* — щелевого отжигания расплава; *III* — полного контакта расплава со стенкой тигля; 1 — холодный тигель; 2 — индуктор; 3 — металлическая ванна; 4 — гарнисаж; 5 — днище

Разливка металла в таких установках производится с использованием донного слива (рис. 5, *a*) либо через сливной охлаждаемый носок путем поворота тигля вокруг оси вращения (рис. 5, *б*).

Большинство плавильных печей с холодным тиглем (УПХТ-1, УПХТ-2 и УПХТ-3) выполнены по принципу слива металла путем наклона (поворота) плавильного модуля вокруг оси вращения [7]. Плавильные модули установок УПХТ-1 и УПХТ-2 помещены в горизонтальные цилиндрические плавильные камеры с двумя торцевыми дверцами, что обеспечивает надежную герметизацию их во время плавки и удобное обслуживание плавильного модуля в подготовительный период (рис. 6). Они являются установками периодического действия, т. е. после каждого цикла, включающего загрузку шихты в тигель, герметизацию плавильной камеры, плавку и разливку металла, производится разгермети-

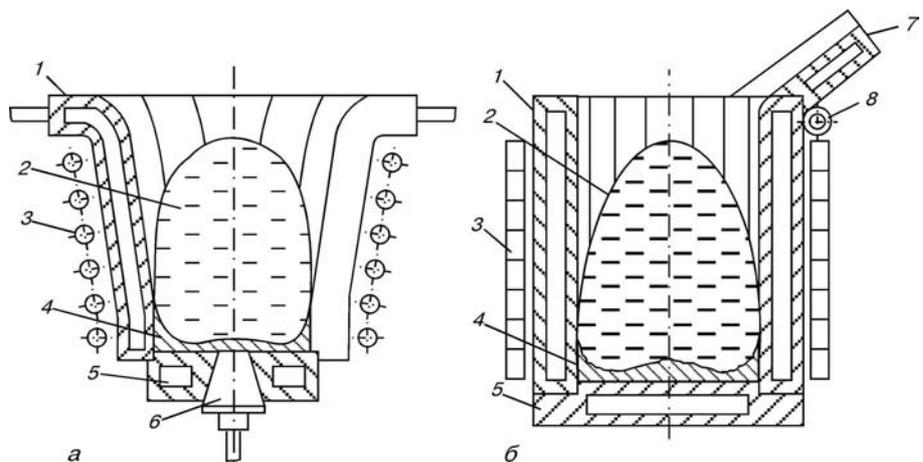


Рис. 5. Схемы плавильных узлов литейных установок с холодным тиглем: *a* — донная разливка металла; *б* — разливка металла поворотом холодного тигля; 1 — холодный тигель; 2 — металлическая ванна; 3 — индуктор; 4 — гарнисаж; 5 — поддон; 6 — устройство для управления сливом металла (пробка); 7 — сливной носок; 8 — ось поворота

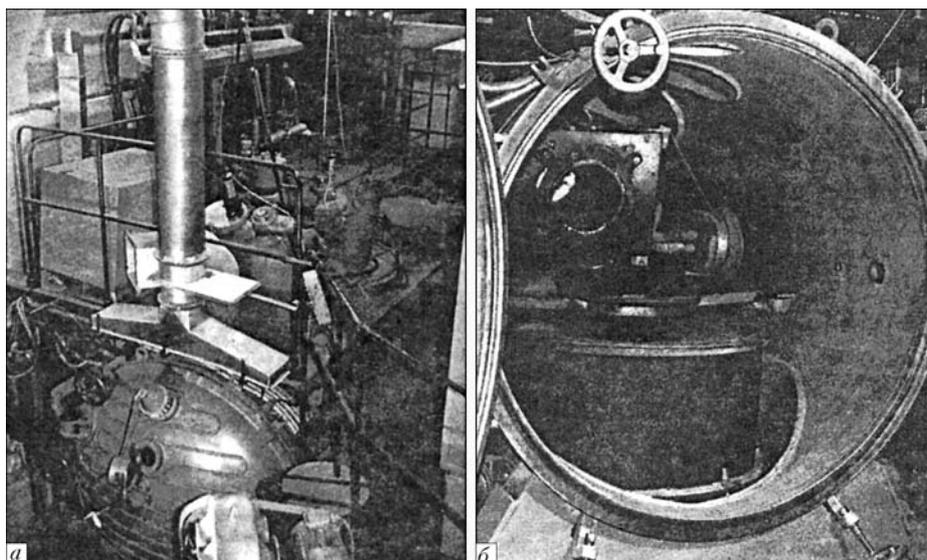


Рис. 6. Литейная индукционная установка с холодным тиглем УПХТ-2 [7]: а — общий вид; б — внутренний объем плавильной камеры

зация плавильной камеры для извлечения литейных форм и подготовки установки к следующей плавке.

Вместимость холодного тигля УПХТ-2 составляет около 100 кг (по титану).

Литейный модуль УПХТ-2 оснащен элементами сопротивления, что позволяет подогревать литейные формы до 1100 °С и получать высокоточное тонкостенное литье, например из высокопрочных конструкционных и жаропрочных сплавов на никелевой основе для авиационного двигателестроения.

Универсальность УПХТ-2 не ограничивается получением фасонных отливок из разнообразных металлов и сплавов путем использования различных способов заливки (стационарные формы или кокили, центробежное литье или литье в горячую форму). Установку можно применять для выплавки сплавов редких металлов, лигатур, припоев и т.д. в виде литых заготовок небольшого развеса из первичных шихтовых материалов или отходов собственного производства в качестве шихты.

При смене переплавляемого сплава или металла необходимо менять остаточный гарнисаж, образовавшийся во время предыдущих плавов, путем отсоединения днищ от тигля и выбивки гарнисажа в положении тигля на слив, т. е. в наклонном (горизонтальном) положении тигля.

Источником питания установки УПХТ-2 служат два машинных преобразователя частоты ОПЧ-500-2,4, работающие в отдельности или параллельно на одну нагрузку с суммарной мощностью 1000 кВт.

На базе установки УПХТ-2 создана печь УПХТ-2М. По утверждению авторов разработки, это улучшенный по компоновке малогабаритный плавильный агрегат лабораторно-промышленного назначения, предназначенный для выплавки хрома. Плавильный модуль с холодным тиглем вместимостью около 25 кг питается от трех ламповых преобразователей частоты мощностью по 160 кВт.

Кроме выплавки сплавов из первичной шихты, в УПХТ можно переплавлять отходы любого вида (в том числе стружку, губку, обрезь) в различном

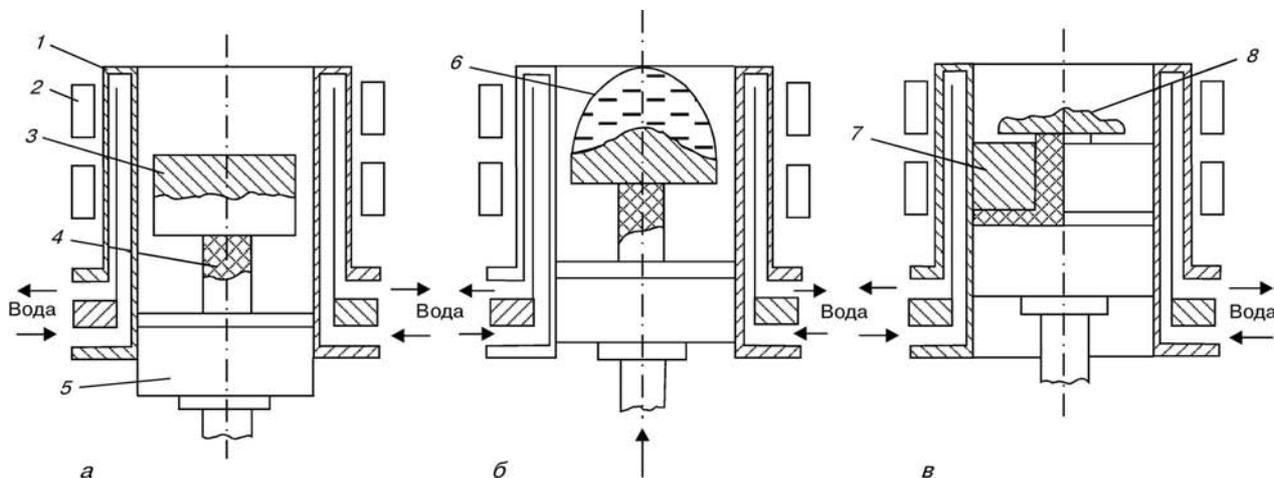


Рис. 7. Пооперационная схема получения полых слитков-заготовок типа втулки путем расплавления мерной заготовки на стержне: а — размещение стержня и заготовки в секционном кристаллизаторе; б — расплавление заготовки; в — затвердевание металла в кристаллизаторе; 1 — секционный кристаллизатор; 2 — индуктор; 3 — мерная расходимая заготовка; 4 — графитовый стержень; 5 — поддон; 6 — металлическая ванна; 7 — полая отливка; 8 — остаточный гарнисаж

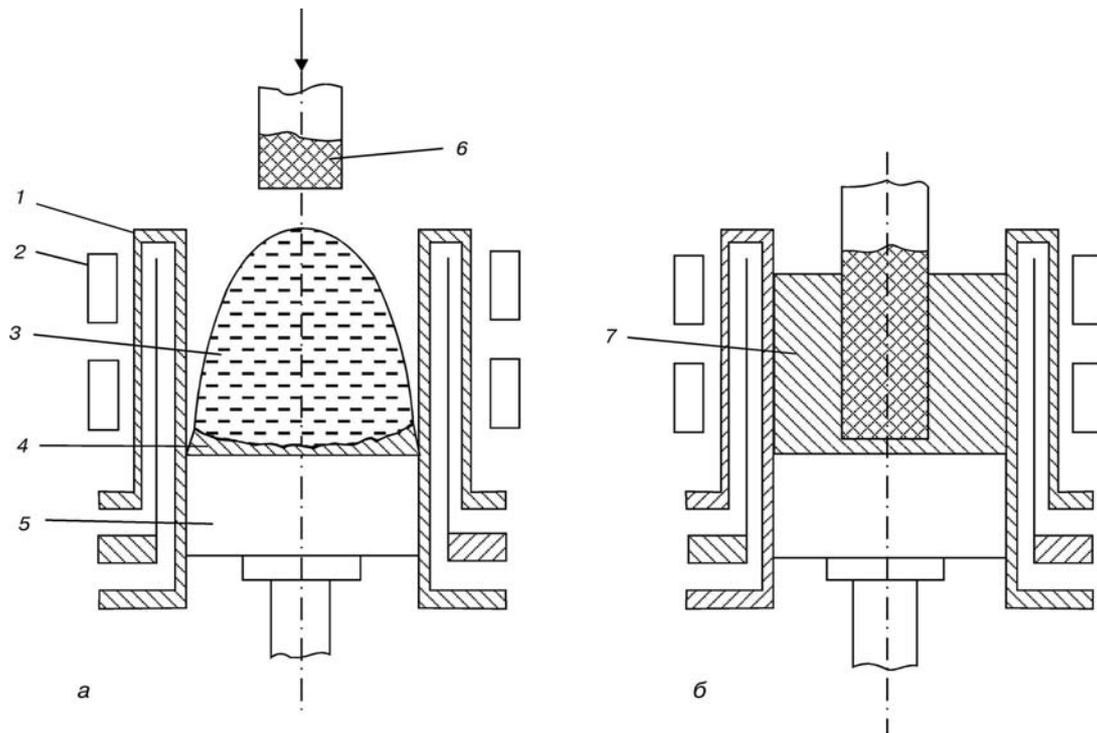


Рис. 8. Пооперационная схема получения полых слитков-заготовок типа втулки с формированием полости подвижным стержнем: *a* — наведение металлической ванны; *б* — затвердевание металла с введенным стержнем; 1 — секционный кристаллизатор; 2 — индуктор; 3 — металлическая ванна; 4 — донный гарнисаж; 5 — поддон; 6 — подвижный стержень; 7 — полая заготовка

процентном соотношении в шихтовой садке (вплоть до 100 %) с введением их в тигель свободной завалкой, т. е. в открытую перед плавкой.

Несмотря на значительные энергозатраты, характерные для печей такого типа (с холодным тиглем), в ряде случаев превышающие 5 кВт·ч/кг, технологические и металлургические возможности позволяют использовать их для выплавки сплавов из первичной шихты и переплава различных отходов, получая конечный продукт за один переплав, без последующих переделов.

Следует отметить, что использование в качестве индукционных литейных печей с холодным тиглем плавильных агрегатов для приготовления металлического расплава заданного химического состава, в отличие от обычных индукционных тигельных печей, позволяет выплавлять сплавы на основе титана, хрома и других высокорреакционных металлов, поскольку металлический расплав не вступает в химическое взаимодействие с холодной стенкой тигля.

Конструкция холодных тиглей различных модификаций и вместимости имеет общий принцип исполнения, т. е. боковая цилиндрическая стенка собрана из водоохлаждаемых медных секций, электрически изолированных друг от друга по смежным плоскостям. Такая конструкция исключает наведение кольцевых токов по наружной поверхности гильзы тигля и в то же время позволяет в каждой секции наводить кольцевые токи в зоне индуктора. В этом случае плавильный модуль, включающий индуктор и цилиндрическую или коническую гильзу тигля, образует единую энергетическую систему, с помощью которой электромагнитное поле, созда-

ваемое током индуктора, передается садке. При этом внутренняя стенка тигля выполняет роль индуктора для садки.

Основной недостаток литейных агрегатов с холодным тиглем заключается в повышенных удельных энергозатратах, в отдельных случаях достигающих 7... 8 кВт·ч/кг слитого металла. Поэтому при создании таких плавильных агрегатов необходимо в первую очередь решить вопросы энергетической экономичности и технологичности конструкции в целом. Причем вопрос плавки металла здесь не является основным, он достаточно хорошо изучен, а энергозатраты на выплавку некоторых металлов и



Рис. 9. Внешний вид полых заготовки диаметром 70 мм со стержнем

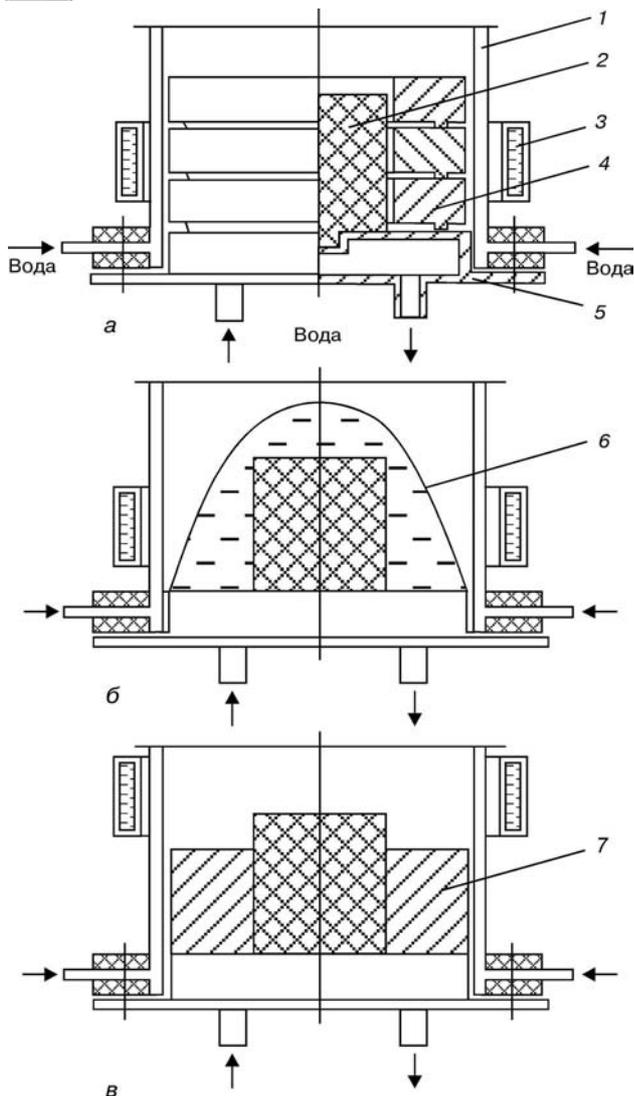


Рис. 10. Пооперационная схема выплавки полых слитков-заготовок типа шайбы на полупромышленной установке ОП117: а – размещение шихты и стержня в секционном кристаллизаторе; б – расплавление шихты; в – затвердевание металла; 1 – кристаллизатор; 2 – графитовый стержень; 3 – индуктор; 4 – шихта; 5 – поддон; 6 – расплавленный металл (ванна); 7 – литая заготовка

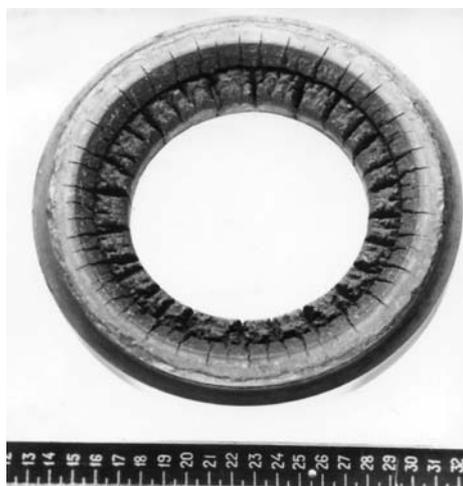


Рис. 11. Внешний вид отработанных элементов литейной оснастки из титанового сплава ОТ4-2

сплавов вполне приемлемы. Конечный технико-экономический результат определяется разливкой металла, поскольку в литейную форму или изложницу в лучшем случае попадает не более 60 % металла [5, 9–11]. В ходе разливки почти половина расплавленного металла намораживается на охлаждаемых элементах плавильного модуля (стенке холодного тигля, днище, сливном носке). К тому же, необходимо решить ряд специфических задач, таких как очистка сливного носка тигля и отверстия в днище тигля, предотвращение образования мостов, стабилизация и минимизация гарнисажа в донной области тигля и т. д. Все это свидетельствует о сложности создания высокоэффективных и экономичных плавильных агрегатов этого типа. Несмотря на то, что многие вопросы индукционной плавки в холодных тиглях хорошо проработаны как в теоретическом, так и в конструкторском направлении, практическое применение их для изготовления отливок не находит широкого распространения в промышленности.

Определенные шаги в изучении и расширении технических возможностей процессов индукционной плавки в холодном тигле и секционном кристаллизаторе сделаны в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Опробовано три варианта получения полых заготовок на лабораторном оборудовании и полупромышленной установке ОП-117. Общим технологическим принципом опробованных способов является получение полых заготовки типа втулки, т. е. с соотношением $h_3/D_3 \leq 1$ (где h_3, D_3 – соответственно высота и диаметр заготовки). В опробованных способах стенка секционного кристаллизатора выполняла роль формирующего элемента боковой поверхности заготовки, а внутренняя полость образовывалась при помощи стержня из огнеупорного материала. Во всех случаях в качестве такового использовали графит.

На рис. 7 представлена схема получения полых металлических заготовок путем расплавления мерной расходуемой заготовки, перед плавкой устанавливаемой в секционном кристаллизаторе на верхнем торце стержня. В начале плавки при помощи подвижного поддона расходуемую мерную заготовку вводят снизу в индуктор и подплавляют ее верхнюю



Рис. 12. Отливка-заготовка диаметром 220 мм с графитовым стержнем, полученная на установке ИПСК

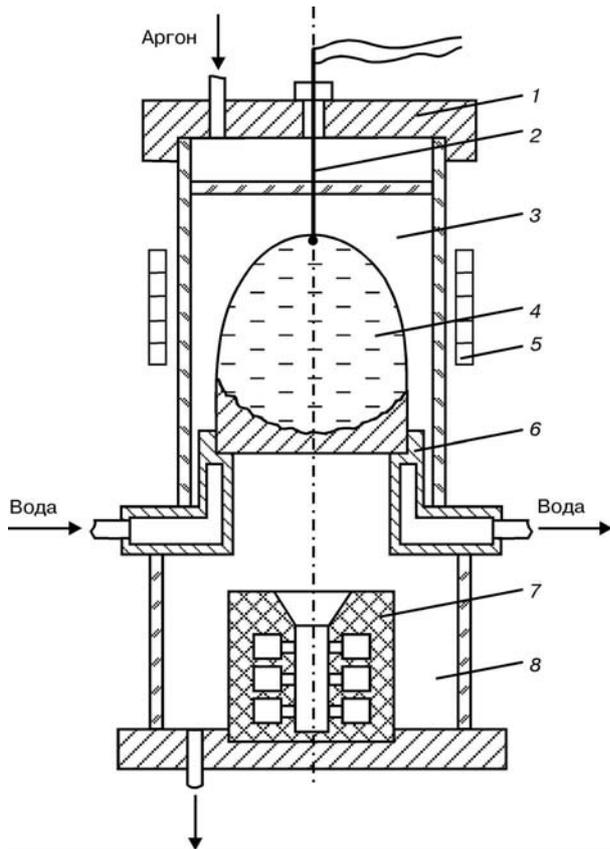


Рис. 13. Схема установки для индукционной плавки металлов на опоре и отливки изделий: 1 — крышка; 2 — термопара; 3 — плавильная камера; 4 — металлическая ванна; 5 — индуктор; 6 — охлаждаемое кольцо (поддон); 7 — литейная форма; 8 — камера для форм

часть. При этом расплавленный жидкий металл удерживается электромагнитным полем на нижней нерасплавленной части (пьедестале).

После этого при помощи поддона расходуюмую заготовку со стержнем постепенно вводят в индуктор. Происходит дальнейшее расплавление расходоуемой заготовки, и образовавшийся жидкий металл проливается на поддон, формируя полную заготовку.

Полую заготовку можно получить и путем введения сверху в металлическую ванну стержня из огнеупорного материала (рис. 8). Для формирования металлической ванны можно использовать следующее:

расплавление мерной расходоуемой заготовки с заранее известным химическим составом;

расплавление кусковой шихты одного сорта или шихты, составленной из материалов с различным химическим составом.

Внешний вид полученной описанным способом полой заготовки показан на рис. 9.

Схема выплавки кольцевой заготовки из титанового сплава ОТ4-2 на полупромышленной установке ОП117 приведена на рис. 10. Сущность этого способа заключается в том, что в секционном кристаллизаторе на поддоне закрепляется графитовый стержень. Кольцевое пространство между стержнем и стенкой кристаллизатора заполняют кусковой шихтой. В работе использовали отработанные кольцевые элементы литейной оснастки (рис. 11). Далее

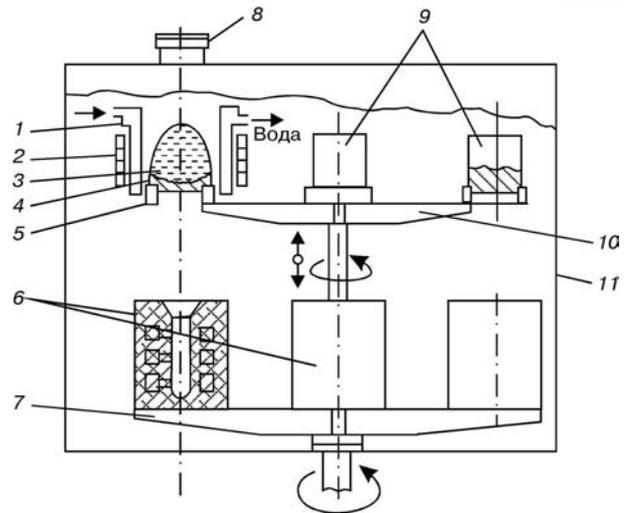


Рис. 14. Схема индукционной установки для получения литых изделий: 1 — секционный кристаллизатор; 2 — индуктор; 3 — металлическая ванна; 4 — гарнисаж; 5 — поддон-кольцо; 6 — литейные формы; 7 — карусель для литейных форм; 8 — смотровая система; 9 — мерные расходоуемые заготовки; 10 — карусель для расходоуемых заготовок; 11 — герметичная (плавильная) камера

при помощи электромагнитного поля, создаваемого током индуктора, расплавляли шихту (рис. 10, б). Частично отжатый от стенки кристаллизатора жидкий металл полностью покрывал стержень. После отключения электромагнитного поля жидкий металл оседал и заполнял кольцевое пространство между стержнем и стенкой кристаллизатора (рис. 10, в).

Внешний вид полученной кольцевой заготовки показан на рис. 12.

При получении полых заготовок описанными способами их масса примерно соответствовала массе однородной металлической ванны, т. е. в результате одной плавки может быть получена одна литая заготовка, что не всегда экономически оправдано.

В работе [12] описан весьма перспективный способ получения отливок, основанный на принципе индукционного плавления металла и удержания полученного расплава на опоре электромагнитными силами. Суть его заключается в том, что расходоуемую мерную заготовку с заданным химическим составом размещают в индукторе при помощи охлаждаемого поддона, выполненного в виде кольца (рис. 13). Соосно под индуктором устанавливают изложницу или литейную форму. При помощи индуктора производится расплавление заготовки. Сначала расплавляют верхнюю часть заготовки, и жидкий металл удерживается электромагнитными силами на нижней нерасплавленной части заготовки, выполняющей роль опоры.

По мере повышения температуры металлической ванны толщина опорной части уменьшается и, наконец, наступает момент, когда она проплавляется, и жидкий металл сливается в форму.

По своим техническим возможностям, включая чистоту выплавленного металла, индукционная плавка на опоре идентична таковой металла во взвешенном состоянии. В то же время наличие опоры



под расплавом позволяет удерживать в электромагнитном поле довольно большую массу металла.

Развивая эту идею для индукционной плавки металла можно использовать плавильный узел, в состав которого входит секционный кристаллизатор небольшой высоты и индуктор (рис. 14). Это позволит исключить неконтролируемые проливы металла с периферии металлической ванны. Применение каруселей для размещения и перемещения расходуемых заготовок и литейных форм позволяет без разгерметизации плавильной камеры производить несколько плавов и заливок литейных форм, что способствует повышению производительности установки и ее технико-экономических показателей.

При создании литейных установок такого типа необходимо учитывать, что перегрев металла при наличии секционного кристаллизатора или холодного тигля незначительный. Как правило, он не превышает 50...60 °С, что для процессов литья, особенно для получения мелких отливок, явно недостаточно. Причем повышение мощности, подводимой к индуктору, не влечет за собой автоматического увеличения температуры металлической ванны, поскольку в этом случае увеличивается силовое воздействие на металлический расплав, и последний больше отжимается от стенки кристаллизатора [1]. Таким образом, тепловоспринимающая поверхность металлической ванны перемещается в область электромагнитного поля с более низкой напряженностью. Следовательно, увеличения тепловыделения в ванне не происходит, и ее температура не повышается.

Одним из путей повышения температуры металлической ванны, необходимой для получения качественных отливок, может быть оснащение плавильно-разливочных агрегатов дополнительными источниками нагрева, например плазменным или электронно-лучевым. Интенсивное перемешивание металлической ванны, характерное для индукционного нагрева, будет способствовать быстрому теплопереносу и выравниванию температуры в объеме ванны.

Дополнительный плазменный нагрев успешно применяется для интенсификации плавки в индукционных печах с керамическими тиглями [13]. Кроме того, дополнительный дуговой нагрев используется при переплаве металлов с высокой температу-

рой плавания в индукционных установках с секционным кристаллизатором [14].

Таким образом, при создании индукционных плавильно-разливочных установок с плавильным модулем на основе секционного кристаллизатора следует учитывать многие технические параметры и технологические возможности процесса, в том числе и возможности оснащения установки дополнительным высококонцентрированным источником нагрева, например дуговым плазмотроном или электронно-лучевой пучковой.

1. *Некоторые особенности индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. Ч. I* // И. В. Шейко, Г. А. Высоцкий, Ю. В. Латаш и др. // Пробл. спец. электротехнологии. — 1989. — № 4. — С. 99–104.
2. *Некоторые особенности индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. Ч. II* // И. В. Шейко, Г. А. Высоцкий, Ю. В. Латаш и др. // Там же. — 1990. — № 1. — С. 93–98.
3. *Sheiko I. V., Latash Yu. V.* Induction melting with an ingot formation in a sectional mould. — Kyev: Institute E. O. Paton. — 1999. — 99 p.
4. *Петров Ю. Б., Ратников Д. Г.* Холодные тигли. — М.: Металлургия. — 1972. — 112 с.
5. *Качур Л. И., Губченко А. П.* Особенности плавки и получения гомогенных сплавов в индукционных печах с холодным тиглем // Цв. металлы. — 1978. — № 3. — С. 67–69.
6. *Тур Л. Л., Губченко А. П.* Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. — М.: Энергоиздат, 1988. — 120 с.
7. *Кудрявцев Ю. Н.* Индукционные тигельные печи для плавки и литья титановых сплавов // Титан. — 1993. — № 1. — С. 39–42.
8. *Тур Л. Л., Фомин Н. И.* Современные методы индукционной плавки // Библиотека электротермиста. — М.: Энергия, 1975. — Вып. 59. — 110 с.
9. *Донской А. В., Ратников Д. Г.* Индукционные плавильные печи с холодным тиглем // К Всесоюзному совещанию по электротермии и электротермическому оборудованию. — М.: ВНИИЭМ, 1964. — Вып. 5. — С. 138–141.
10. *Clites P. G., Beall R. A.* Inductostag melting of titanium // Kept. Investing. Bur. Mines. U.S. Dept. Interior. — 1969. — № 7268. — P. 1–20.
11. *Качур Л. И.* Индукционные тигельные печи для плавки и литья титановых сплавов: Сб. науч. тр. — М.: ВНИИМИ, 1987. — С. 65–68.
12. *Cervellero P.* Levitation — melting method: intriques investment casters // Advanced materials and processis. — 1991. — № 3. — P. 42–45.
13. *Костяков В. Н.* Плазменно-индукционная плавка. — Киев: Наук. думка, 1991. — 207 с.
14. *Рудой А. П., Фиалковский Р. В.* Индукционно-дуговой способ плавания металлов // Металлофизика. — 1976. — Вып. 65. — С. 104–107.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 08.10.2007