

УДК 669.187.58

ИНДУКЦИОННЫЙ ПЕРЕПЛАВ МЕТАЛЛОВ В СЕКЦИОННОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

Б. Е. Патон, И. В. Шейко, В. А. Шаповалов

Приведены основные характеристики индукционного источника нагрева. Отмечено, что положительные качества индукционного источника нагрева в плавильных индукционных печах используются не в полной мере в связи с тем, что в процессе плавки жидкий металл контактирует с тиглем из огнеупорного материала и загрязняется неметаллическими и газовыми примесями, а при индукционной плавке в холодном тигле или секционном охлаждаемом кристаллизаторе источник загрязнения металлического расплава (огнеупорный тигель) отсутствует. Даны примеры использования промышленного индукционного переплава в секционном кристаллизаторе, а также возможные пути его дальнейшего развития.

Main characteristics of induction heat source are given. It was outlined that the positive characteristics of induction heat sources in melting induction furnaces are used not completely due to the fact that the molten metal during melting contacts a crucible of refractory material and is contaminated with non-metallic and gas impurities, while during induction melting in a cold crucible or sectional water-cooled mould the source of contamination of metallic melt (refractory crucible) is absent. Examples of application of industrial induction remelting in a sectional mould, as well as the possible ways of its further development are given.

Ключевые слова: индуктор; секционный кристаллизатор; металлическая ванна; электромагнитное поле; слиток; сплав; структура; дисперсирование; тигель

В современной металлургии широко используются различные источники электрического нагрева для плавки и рафинирования металлов и сплавов, главными из которых являются следующие:

- электрическая дуга;
- поток направленных электронов (электронный луч);
- джоулево тепло, выделяемое в шлаковом расплаве;
- низкотемпературная дуговая плазма;
- индукционный нагрев.

Физические особенности каждого из источников электрического нагрева определяют технологические возможности процессов плавки, основанных на применении указанных источников.

Индукционный нагрев применяется в различных отраслях техники, например при сварке, пайке и термообработке металлов, а также при плавке различных металлов и сплавов, что обусловлено комплексом следующих уникальных физических и технологических свойств [1–7], присущих индукционному источнику нагрева:

высокая стерильность источника тепловой энергии (не оказывает негативного влияния на свойства нагреваемого материала);

интенсивное перемешивание жидкого металла в ходе плавки (способствует выравниванию температуры и химического состава в объеме ванны);

отсутствие локального перегрева металла (обеспечивает низкий угар легирующих элементов);

отсутствие жесткой связи между подводимой электрической мощностью и скоростью плавки;

возможность выдерживать металлический расплав в жидком состоянии неограниченное время;

отсутствие необходимости в создании каких-либо специальных условий для его работы (технологические процессы можно осуществлять в газовой среде любого состава и при разных значениях давления, в том числе и в вакууме);

простота регулирования и поддержания температуры нагреваемого тела в заданном диапазоне;

высокая степень надежности в работе и хорошая адаптация в системе автоматизации технологического оборудования, используемого в процессах индукционного нагрева.

Отмеченные особенности индукционного источника нагрева обуславливают непрерывное расширение сферы его применения в различных отраслях промышленности.

Первая промышленная индукционная тигельная печь с питанием от дугового генератора создана в



1912–1913 гг. Дюбуа-Лоренц, а в 1916 г. в США построили индукционную тигельную печь с питанием от искрового генератора.

Несколько позже в качестве источников питания повышенной частоты начали использовать электрические машины индукторного типа. Одну из первых конструкций таких машин предложил еще в 1877 г. русский электротехник П. Н. Яблочков [8].

В 1920-е гг. под руководством профессора В. П. Вологодина создан ряд конструкций электромагнитных преобразователей частоты применительно к поверхностной закалке изделий и индукционной плавке металлов.

В 1930-е гг. впервые в бывшем СССР на Ленинградском заводе «Электрик» организован промышленный выпуск индукционных тигельных печей повышенной частоты, разработанных в лаборатории В. П. Вологодина при Ленинградском электротехническом институте.

Первая опытная индукционная канальная печь с открытым горизонтальным каналом создана в Англии в 1887 г., а первая промышленная канальная печь аналогичного типа с установленной мощностью 170 кВт и вместимостью около 1800 кг по стали построена в Швеции в 1899 г. Печи с открытыми каналами были неудобны и неэкономичны из-за сильного окисления металла в процессе плавки, а также значительной удаленности канала с жидким металлом от магнитопроводов.

В бывшем СССР индукционные канальные печи, предназначенные для плавки алюминия, цинка, магния и латуни, начали строить на ряде предприятий цветной металлургии в 1930-е гг.

В послевоенные годы в связи с освоением новых огнеупорных материалов, созданием мощных преобразователей частоты на предприятиях черной и цветной металлургии, а также в литейных цехах машиностроительных заводов были построены индукционные канальные и тигельные печи, вместимость которых достигала нескольких десятков тонн.

Таким образом, индукционный способ нагрева как самостоятельный и перспективный технологический процесс начал формироваться в 1920–1930-х гг. и своего расцвета достиг в послевоенные годы. Кроме выплавки металлов и сплавов, он начинает широко применяться при термообработке, сварке и пайке, в кузнечном и штамповом производстве для нагрева заготовок [5, 7]. В последующие годы создаются специализированные технологии и оборудование для плавки цветных металлов, отливки слитков в магнитные кристаллизаторы, получения монокристаллов и др. [9–17].

Все многообразие индукционных процессов плавки и плавильные агрегаты, созданные за эти годы, можно разделить на такие три группы:

тепловая энергия выделяется в нагреваемом материале, а полученный расплав не соприкасается с материалом тигля (плавка во взвешенном состоянии; бестигельная зонная; с электромагнитным удержанием расплава на опоре; гарниссажная; в хо-

лодных тиглях и секционных кристаллизаторах) [15, 18–27];

металлический расплав на протяжении всей плавки контактирует с огнеупорным материалом тигля, а тепловая энергия выделяется непосредственно в расплаве или шихте. Представителями этой группы являются все типы индукционных печей с огнеупорными тиглями и канальные индукционные печи;

тепловая энергия выделяется в тигле, выполненном из электропроводного материала, удельное сопротивление и температура плавления которого значительно выше, чем у переплавляемого металла, нагрев и плавление шихты, а также перегрев металлического расплава происходят благодаря теплоотдаче от более нагретой стенки тигля. К этой группе относятся установки, в которых плавка металлов происходит в графитовых или металлических тиглях, изготовленных из тугоплавких металлов (молибден, ниобий, тантал и др.).

В настоящее время наибольшее промышленное применение получили индукционные тигельные и канальные печи, в которых выплавляют практически весь известный сортимент сплавов черных и цветных металлов, за исключением особо тугоплавких (молибден, ниобий, тантал и др.).

Однако и эти плавильные агрегаты имеют недостаток, не позволяющий в полной мере реализовать преимущества индукционного источника нагрева и, безусловно, сужающий их технические возможности. Он состоит в том, что 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 интенсифицирует этот процесс и способствует насыщению металла продуктами реакции взаимодействия.

Задача устранения источника загрязнения жидкого металла решена в агрегатах для индукционной плавки с холодным тиглем (ИПХТ) и охлаждаемым секционным кристаллизатором (ИПСК) [23, 24]. Процесс ИПХТ отличается от плавки в обычной индукционной тигельной печи тем, что плавление шихты и накопление жидкого металла происходит в охлаждаемом секционном тигле, стенка которого «прозрачна» для высокочастотного электромагнитного поля, создаваемого индуктором. Накопленный в холодном тигле жидкий металл разливают в изложницы или литейные формы.

Главными недостатками указанного процесса являются чрезвычайно большая энергоемкость (7...10 кВт·ч/кг), низкая производительность, традиционно невысокое качество слитков, кристаллизующихся в изложнице, и небольшой слив металла, поскольку до 40 % металла кристаллизуется во время разлива на стенке холодного тигля и в сливном носке.

Более прогрессивным процессом выплавки слитков с использованием индукционного источника нагрева является ИПСК, разработанный в Инсти-

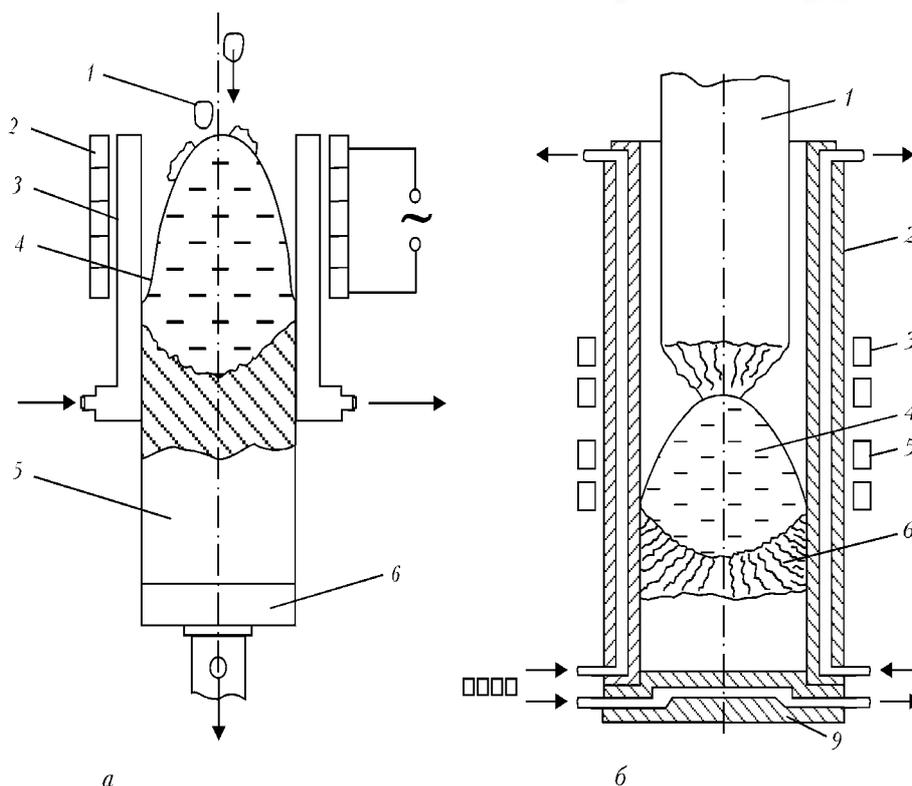


Рис. 1. Принципиальная схема индукционного переплава в секционном кристаллизаторе: *a* — переплав кусковой шихты; *б* — переплав расходуемой заготовки; 1 — шихта; 2 — индуктор; 3 — секционный кристаллизатор; 4 — металлическая ванна; 5 — слиток; 6 — поддон; 7 — расходуемая заготовка

туте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. В рабочем объеме металлического секционного кристаллизатора, выполненного из водоохлаждаемых секций, электрически изолированных друг от друга по смежным плоскостям, при помощи индуктора ограниченной высоты (высота индуктора $H_{инд} = 0,7... 1,2 D_{кр}$) создают высокочастотное электромагнитное поле, в котором наводят металлическую ванну путем расплавления кусковой шихты или последовательного оплавления расходуемой заготовки (рис. 1).

Индукцированные в секциях кристаллизатора токи в зоне индуктора создают вторичное электромагнитное поле, в котором происходит расплавление металла и наведение металлической ванны, т. е. секционная стенка кристаллизатора является своеобразным индуктором для переплавляемой металлической заготовки и металлической ванны (рис. 2).

Кроме того, через межсекционные зазоры в плазменную зону проникает электромагнитное поле, создаваемое током индуктора. В результате взаимодействия токов, протекающих в системе индуктор–кристаллизатор–загрузка (И–К–З), процесс ИПСК сопровождается отжатием металлического расплава от стенки кристаллизатора в зоне индуктора (рис. 3) и интенсивным перемешиванием металла. Электрический КПД системы И–К–З составляет 32... 43 %, т. е. в загрузке выделяется $0,32... 43 P_{инд}$ ($P_{инд}$ — электрическая мощность, подводимая к индуктору).

Перемешивание металлической ванны и отсутствие ее контакта с охлаждаемой стенкой кристаллизатора является важнейшим технологическим

преимуществом процесса, поскольку это обеспечивает выравнивание температуры и химического состава в объеме ванны, увеличивает ее открытую поверхность, снижает тепловые потери во время плавки и способствует выносу на поверхность металлической ванны неметаллических и газовых примесей. Кроме того, в случае применения для обработки расплава шлаков на границе шлак–металл значительно ускоряются массообменные процессы, что, в конечном итоге, способствует более глубокому рафинированию металлического расплава.

В качестве шихты могут использоваться сыпучие или кусковые металлические материалы, порцион-

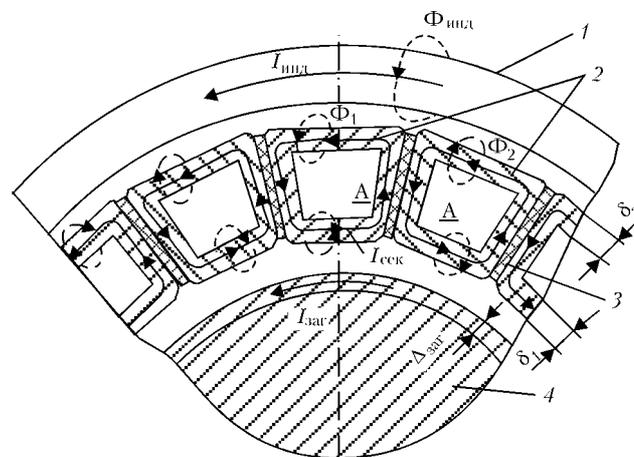


Рис. 2. Схема протекания токов в элементах системы И–К–З и вероятная картина магнитных полей в ней: 1 — индуктор; 2 — секции кристаллизатора; 3 — диэлектрическая прокладка; 4 — загрузка

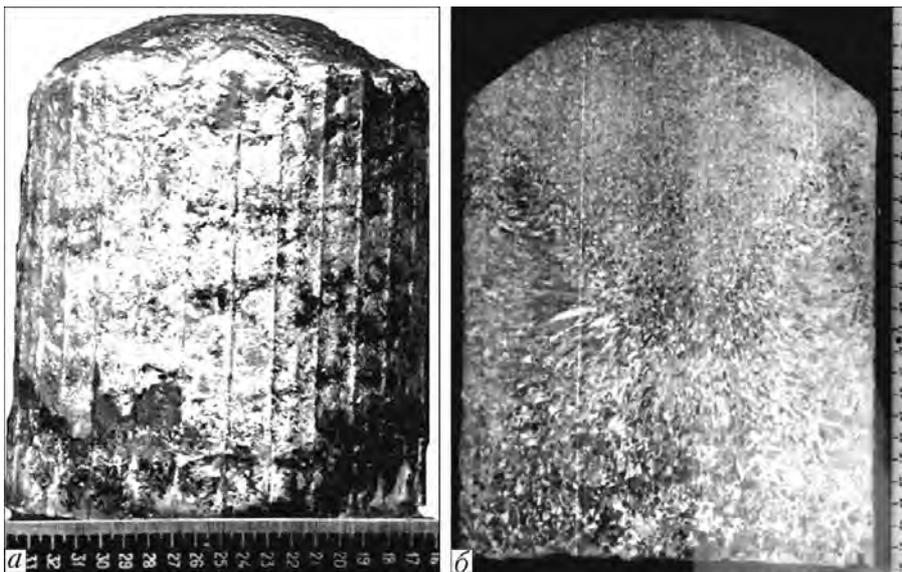


Рис. 3. Внешний вид головной части слитка ИПСК (а) и его макроструктура (б); $d_{сл} = 200$ мм, титановый сплав ОТ4-2

но подаваемые по ходу плавки в металлическую ванну, или расходуемая заготовка с заданным химическим составом.

Направляемый слиток в процессе плавки либо вытягивают из кристаллизатора, либо перемещают индуктор относительно кристаллизатора. Преимуществами схемы с вытягиванием слитка являются небольшие металлоемкость и стоимость кристаллизатора, а недостаток состоит в том, что при вытягивании слитка возможно образование поперечных трещин на поверхности слитка.

При выплавке без вытягивания слитков не перемещается относительно стенки кристаллизатора, по-

этому и кристаллизатор, и слиток не испытывают механических нагрузок, обусловленных трением слитка о стенку кристаллизатора. Основные недостатки этой схемы — большая металлоемкость, сложная технология изготовления и высокая стоимость кристаллизатора.

Независимый источник тепла при ИПСК позволяет довольно гибко управлять процессом кристаллизации слитка, что особенно важно для формирования структуры его головной части. Путем варьирования мощности, подводимой к индуктору на завершающем этапе плавки, можно обеспечить практически полное выведение усадочной раковины

в головной части слитка (рис. 3). Кристаллическое строение и макроструктура слитков ИПСК аналогична таковым слитков известных переплавных процессов (ВДП, ЭШП, ЭЛП и ПДП).

В Институте электросварки им. Е. О. Патона за последние 20–25 лет проведен большой комплекс научно-исследовательских, технологических и проектно-конструкторских работ, позволивших определить основные возможности и параметры процесса ИПСК, оценить качество выплавляемого металла и создать ряд плавильных агрегатов и технологий, в разное время успешно прошедших опытно-промышленную проверку.

Так, благодаря внедренным на ПО «Киевтрактородеталь» технологии индукционного переплава отработанных элементов литейной оснастки из титанового сплава ОТ4-2 и полупромышленной установки ОП-117 в свое время полностью решена проблема вовлечения в технологический металлооборот образующихся на предприятии титановых отходов. Выплавляемые из отходов слитки диаметром 200... 220 мм (рис. 4) в дальнейшем использовали для изготовления новых деталей литейной оснастки машин центробежного литья гильз.

Весьма эффективными оказались разработанные в Институте электросварки им. Е. О. Патона и внедренные на одном из предприятий редкоземельной подотрасли бывшего Советского Союза опытно-промышленная установка ИПСК ОП-151 и технология рафинирования отходов ванадийсодержащей лигатуры АВТУ, включающей 47... 53 % ванадия. Производимая алюмотермическим способом лигатура имеет ряд недостатков — высокая загрязненность металла неметаллическими включениями, их неравномерное распределение в объеме слитка и повышенное содержание кислорода, в результате чего до 35 % лигатуры отбраковывается (около 25 т в год).



Рис. 4. Промышленные слитки, выплавленные из отходов титанового сплава ОТ4-2



В процессе ИПСК отходов происходит полное удаление крупных неметаллических включений, заметно снижается содержание кислорода, а также примесей железа и меди. Применение бескислородного флюса CaF_2 оказывает положительное влияние на качество поверхности выплавляемых слитков и способствует более глубокому рафинированию металла (рис. 5).

Интенсивное перемешивание металлической ванны при ИПСК и ее развитая куполообразная открытая поверхность создают чрезвычайно благоприятные условия для рафинирования переплавляемого металла. Это обстоятельство использовали при разработке опытно-промышленной технологии рафинирования черновых редкоземельных металлов, прошедшей всесторонние лабораторные испытания и успешно опробованной в промышленных условиях. Основная задача, решенная с помощью этой технологии, — быстрая и глубокая отгонка из чернового РЗМ кальция для его соответствия марочному составу. Процесс отгонки кальция при ИПСК протекает в 4–6 раз быстрее, чем при традиционной технологии, основанной на электродуговой гарнисажной плавке.

Платина и сплавы на ее основе применяются для производства химической посуды, тиглей для варки оптического стекла и фильерных тиглей для получения стекловолокна. На предприятиях, производящих и эксплуатирующих изделия из платины, образуется довольно большое количество отходов в виде обрезки, стружки, лома и др. Разработанные в Институте электросварки им. Е. О. Патона плавильные установки и технологии переплава этих отходов в свое время прошли всестороннюю промышленную апробацию. С их помощью можно выплавлять более чистые слитки, чем при открытой индукционной плавке. После ИПСК содержание таких примесей, как железо и свинец, снижается соответственно от 0,01 до 0,006 и от 0,012 до 0,007 %. Плотность металла несколько выше, чем при открытой индукционной плавке. ИПСК отходов платины характеризуется сравнительно невысоким расходом электроэнергии — 2,5... 3,0 кВт·ч/кг.

Новым направлением в применении комбинированного индукционно-плазменного нагрева является выращивание монокристаллов тугоплавких металлов и сплавов.

Выплавка монокристаллов тугоплавких металлов (вольфрама или молибдена) технически очень трудная задача, решить которую стало возможным с появлением таких высококонцентрированных источников тепловой энергии, как электронно-лучевые пушки и дуговые плазмотроны [27, 28]. Плазменно-дуговой нагрев, применяемый при выращивании монокристаллов тугоплавких металлов, позволяет расплавить довольно большой объем металла, а также создать в плавильной камере газовую атмосферу заданного состава и давления, что выгодно отличает его от электронно-лучевого нагрева.

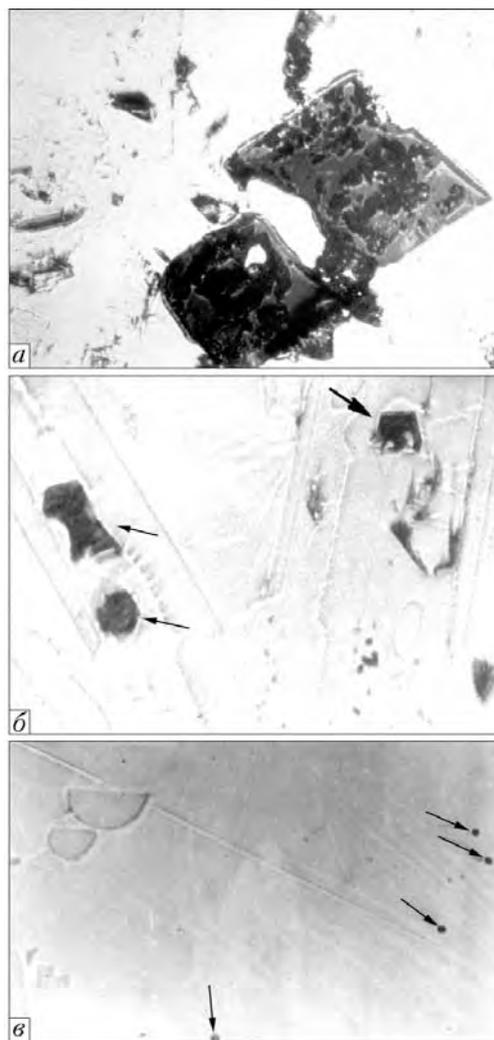


Рис. 5. Неметаллические включения в лигатуре АВТУ: а — исходный металл (отходы); б — после ИПСК в аргоне; в — то же, с добавкой флюса CaF_2

Для увеличения размеров монокристаллов тугоплавких металлов, в первую очередь их диаметра, требуется применение электронно-лучевых и плазменно-дуговых нагревателей большой единичной мощности, что приводит к ухудшению структуры монокристаллов.

Снизить температурный градиент и гомогенизировать температурное поле в монокристалле при его выплавке до уровня, при котором негативное влияние температурного фактора на структуру менее выражено, можно с помощью комбинированного нагрева двух источников тепла, например плазменно-дугового и индукционного.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработали способ плазменно-индукционного выращивания монокристаллов тугоплавких металлов, позволяющий получать монокристаллы плоской формы с высоким качеством монокристалльности (рис. 6). Сущность этого способа заключается в следующем. Затравку, имеющую заданную кристаллографическую ориентацию, закрепляют на водоохлаждаемом поддоне и с помощью механизма вытягивания размещают в индукторе. При помощи

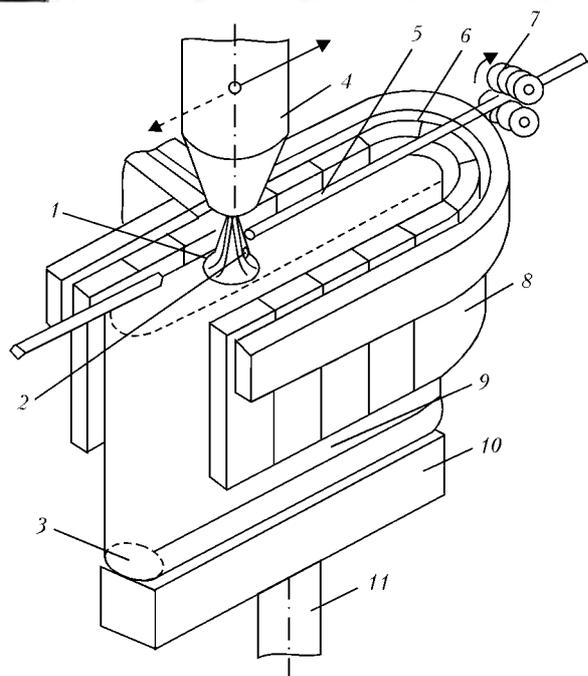


Рис. 6. Принципиальная схема плазменно-индукционного выращивания профилированных монокристаллов (Институт электросварки им. Е. О. Патона): 1 — локальная металлическая ванна; 2 — капля металла; 3 — затравка; 4 — плазмоторн; 5 — расходимый пруток; 6 — индуктор; 7 — механизм подачи прутков; 8 — секционная водоохлаждаемая стенка; 9 — монокристалл; 10 — поддон; 11 — шток механизма вытягивания монокристалла

плазмоторна на затравке наводят локальную металлическую ванну. В столб плазменной дуги, горячей между плазмоторном и затравкой, вводят сбоку по стороне длинной грани расходимый пруток. Под

воздействием плазменной дуги происходит оплавление конца прутка, и жидкий металл в виде капель переходит в металлическую ванну. При этом плазмоторн перемещают вдоль выплавляемой грани в сторону прутка, чем обеспечивают подпитку ванны при ее перемещении. Достигнув края грани, плазмоторн начинает возвратное движение, в начале которого со стороны, противоположной движению плазмоторна, подводят другой пруток. Возвратное перемещение плазмоторна приводит к наплавлению другого слоя и, таким образом, происходит послойное формирование монокристалла.

Этот процесс протекает довольно стабильно при небольших размерах наплавленной грани (примерно до 100 мм). Удлинение наплавленной грани вызывает необходимость увеличения длины индуктирующего витка. Поэтому для сохранения удельной мощности, приходящейся на единицу длины индуктирующего витка, требуется повышать мощность, подводимую к индуктору, что вызывает повышение напряжения на индукторе и в свою очередь способствует возникновению электрических пробоев между монокристаллом и индуктором.

Указанные нарушения электрического режима негативно отражаются на тепловой ситуации в области металлической ванны, приводящей к ухудшению качества структуры монокристалла и образованию паразитных субзерен.

Устранить электрические пробои и стабилизировать тепловую ситуацию в зоне металлической ванны удалось благодаря размещению секционированной охлаждаемой стенки типа секционного кристаллизатора между индуктором и монокристаллом [29].

Секции этой стенки электрически изолированы друг от друга по смежным плоскостям при помощи диэлектрических прокладок. Кроме того, стенка электрически нейтральна по отношению к индуктору, а между стенкой и монокристаллом во время плавки образуется газовый зазор в несколько миллиметров.

Поэтому секционированная водоохлаждаемая стенка, установленная между монокристаллом и индуктором, «снизила» напряженность электромагнитного поля в зоне плазменной дуги, поскольку создаваемое индуктором поле было разделено при помощи секций на ряд полей в соответствии с количеством секций. Установка водоохлаждаемой стенки типа секционного кристаллизатора позволила устранить условия, способствующие возникновению электрических пробоев в зоне плазменной дуги, что положительно отразилось на качестве выплавляемых монокристаллов.

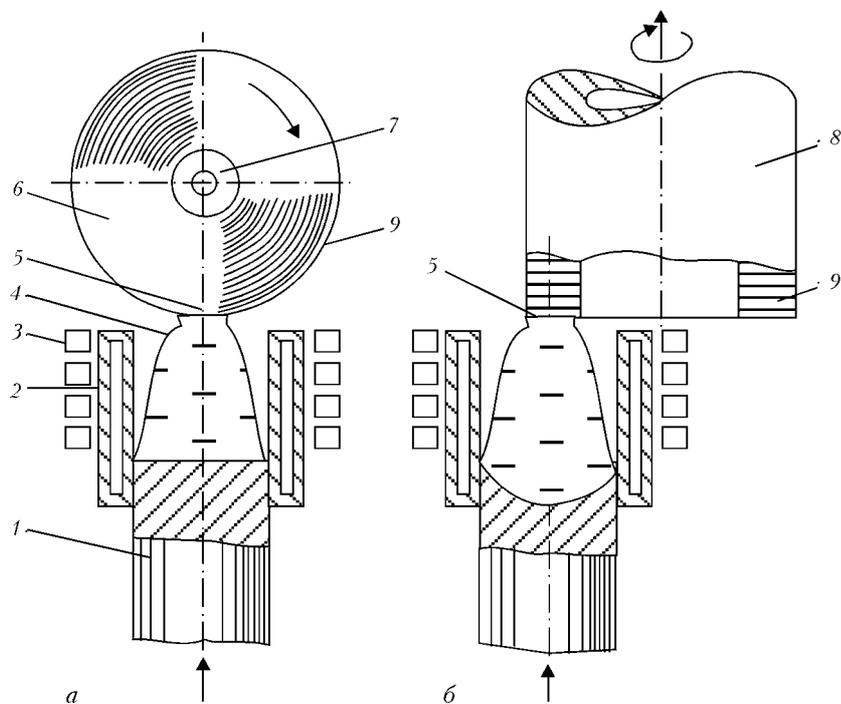


Рис. 7. Схемы получения металлических заготовок типа диска (а) и трубы (б) на базе индукционной плавки в секционном кристаллизаторе: 1 — расходимая заготовка; 2 — секционный кристаллизатор; 3 — индуктор; 4 — намораживаемая заготовка; 5 — контактная зона заготовки с металлической ванной; 6 — намораживаемая заготовка (диск); 7 — затравка; 8 — намораживаемая заготовка (труба); 9 — слон намороженного металла



Рис. 8. Внешний вид заготовки диаметром 180 мм (типа диска), полученной послойным намораживанием

Одной из разновидностей индукционной плавки является так называемая плавка на пьедестале, суть которой заключается в следующем. Снизу в индуктор подается металлическая расходуемая заготовка. Под воздействием высокочастотного электромагнитного поля, создаваемого индуктором, происходит оплавление верхнего торца заготовки с образованием металлической ванны, удерживаемой на торце заготовки силами поверхностного натяжения. Высота расплавленного слоя на верхнем торце заготовки (пьедестале) ограничивается несколькими миллиметрами. Приготовленный таким образом расплав может быть использован для получения различных металлических заготовок. Наиболее широко он применяется для выращивания монокристаллов различных металлов и полупроводников.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разработаны основные принципы получения металлических заготовок на базе индукционной плавки в секционном кристаллизаторе, в котором плавка на пьедестале совмещена с послойным намораживанием приготовленного расплава на вращающуюся затравку. Такой процесс позволяет производить металлические заготовки в виде тел вращения, например диска (рис. 7, а, 8) или трубы (рис. 7, б).

Основным достоинством предложенного способа является отсутствие контакта металлического расплава с огнеупорами и интенсивное его перемешивание, что исключает загрязнение металла неметаллическими включениями и газовыми примесями, способствует выравниванию температуры и равномерному распределению легирующих элементов в объеме металлической ванны.

Толщина намораживаемых слоев зависит от многих факторов (теплофизических свойств металла, подводимой к индуктору мощности, линейной скорости перемещения контактной дорожки затравки относительно расплава и т. д.). При установившемся режиме намораживания она обычно составляет 0,5... 1,0 мм. Размер кристаллов в заготовке, как правило, находится в пределах толщины намораживаемых слоев.

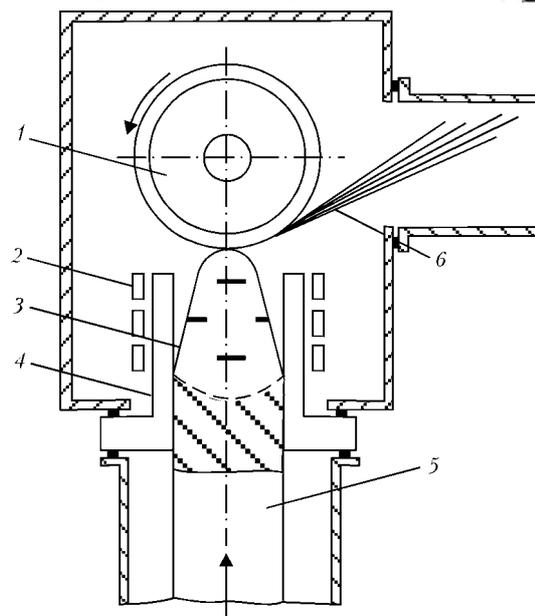


Рис. 9. Принципиальная схема процесса получения быстрозакаленных чешуйчатых материалов (Институт электросварки им. Е. О. Патона): 1 — диск-кристаллизатор; 2 — индуктор; 3 — металлическая ванна; 4 — секционный кристаллизатор; 5 — расходуемая заготовка; 6 — быстрозакаленные чешуйки

Использование данного процесса может быть весьма эффективным при производстве заготовок и полуфабрикатов из интерметаллидов или сплавов, имеющих широкий интервал кристаллизации, поскольку при намораживании металла слоями ограниченной толщины ликвационные процессы, связанные с особенностями кристаллизации этих сплавов, не получают развития.

В последние годы возрос интерес к проблеме получения и использования в промышленных масштабах металлических материалов, производимых способами сверхбыстрой закалки из расплава. Эти материалы ввиду специфического кристаллического строения значительно превосходят по своим свойствам (механическим, электрофизическим, магнитным и др.) обычный литой или деформированный металл.

Кроме того, благодаря сверхбыстрой закалке металлов и сплавов из жидкого состояния можно фиксировать в твердом продукте состав, соответствующий расплавленному состоянию, и, таким образом, получать сплавы из компонентов, образующих растворы только в жидком состоянии. При этом в металлическом продукте происходит формирование специфической структуры — от аморфной до мелкозернистой с ультрамелкими размерами зерен (в зависимости от скорости кристаллизации металла).

Для получения металлического продукта с аморфной структурой необходимо обеспечить весьма высокую скорость кристаллизации, недостижимую при обычных способах разлива металла ($1 \cdot 10^5$ К/с и выше). При этом процесс охлаждения должен обеспечивать на границе раздела расплава и охлаждающего тела высокую теплоотдачу. Поскольку скорость передачи тепла от расплава к газу или жидкости обычно меньше скорости теплопередачи на



Таблица 1. Химический состав диспергированных металлов и сплавов

Марка сплава	Массовая доля элементов, %					
	Fe	Al	Ni	Cr	Ti	Mn
Алюминиевый сплав Д16	0,3	Основа	–	–	–	–
Жаропрочный сплав ЭП648	Mo = 2,4	1,06	Основа	31,6	W = 4,4	0,3
Сплав с памятью формы системы Ni-Ti	–	–	50,1	–	49,12	–
Технический титан ВТ1-0	0,2	–	–	–	Основа	–
Магнитный сплав системы Nd-Fe-B	65,1	–	Nd = 33,8	B = 0,9	–	–

границе с твердыми телами, то во всех способах быстрой закалки из расплава в качестве холодильника применяют металлические поверхности, дополнительно охлаждаемые хладагентами [24].

Существует множество различных способов реализации этого принципа, отличающихся либо взаимным расположением теплоприемника (кристаллизатора) и металлического расплава, либо способом формирования металлопродукта из расплава. Наиболее распространены спиннингование, прокатка между двумя охлаждаемыми валками и экстракция (диспергирование) расплава.

Серьезным недостатком указанных способов является использование тигля из огнеупорного материала, в котором производится расплавление металла, что приводит к загрязнению расплава продуктами взаимодействия последнего с огнеупорами и отрицательно сказывается на качестве получаемого металлопродукта. Кроме того, в огнеупорных тиглях не представляется возможным плавить высокорекреакционные металлы или сплавы, содержащие эти металлы, а также металлы с высокой температурой плавления. Активному взаимодействию расплава с огнеупорами тигля способствует и интенсивная циркуляция расплава в электромагнитном поле, создаваемом индуктором.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины разработан процесс диспергирования расплава, в котором огнеупорный тигель заменен секционным охлаждаемым кристаллизатором, т. е. для приготовления расплава используют процесс ИПСК.

Совмещение ИПСК и сверхбыстрой кристаллизации металла (рис. 9) позволяет исключить контакт металлического расплава с огнеупорами и тем самым решить вопрос получения быстрозакаленных металлических материалов из высокорекреакционных металлов, например титана, редкоземельных металлов, а также сплавов, содержащих эти металлы в качестве легирующих элементов.

Особенностью данного процесса является применение расходуемой металлической заготовки заданного химического состава для получения расплава и его последующего диспергирования.

Заготовку вводят снизу в секционный кристаллизатор, в котором расплавляют ее части на уровне индуктора. Образующаяся металлическая ванна

опирается на нерасплавившуюся нижнюю часть заготовки. В зоне индуктора металлический расплав под действием электромагнитного поля отжимается от стенки секционного кристаллизатора и принимает куполообразную форму.

Путем подбора электрической мощности, подвешиваемой к индуктору, выпуклый мениск расплава можно приподнять над верхним срезом кристаллизатора и стабильно удерживать в этом положении. Вращающийся диск-кристаллизатор опускают до его касания поверхности мениска расплава и осуществляют диспергирование жидкого расплава. Намороженный на рабочей дорожке диска тонкий слой металла под действием центробежных сил отрывается от дорожки диска и в виде ленты или чешуек (в зависимости от формы рабочей дорожки и диска) попадает в специальный накопитель в плавильной камере установки.

Плавку и диспергирование металла производят в инертном газе, что обеспечивает более высокую скорость кристаллизации металла, чем в вакууме. Кроме того, в вакууме затрудняется отделение намороженного металла от рабочей дорожки диска и создаются условия для неконтролируемого налипания металла на рабочей дорожке.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона создан опытный образец модуля для диспергирования с охлаждаемым диском-кристаллизатором диаметром 170 мм, который можно размещать в плавильной камере установки для индукционной плавки в секционном кристаллизаторе (рис. 10). Скорость вращения диска можно регулировать от 1000 до 4000 об/мин. Линейная скорость кристаллизации на рабочей дорожке может достигать 40 м/с. Созданный модуль опробован в составе установки ИПСК (диаметр кристаллизатора 68 мм) при диспергировании различных металлов и сплавов. Химический состав сплавов, диспергированных при помощи этого модуля, приведен в табл. 1.

Экспериментальная проверка и отработка режимов диспергирования металлических расплавов показали, что разработанный процесс позволяет получать пластинки чешуйчатой формы (ПЧФ) толщиной 15... 50 мкм. Скорость кристаллизации достигает $1 \cdot 10^6 \dots 1 \cdot 10^7$ град/с.

Столь высокие скорости кристаллизации металла приводят к формированию уникальной структу-



Таблица 2. Показатели коэрцитивной силы магнитного сплава системы Nd-Fe-B

Способ получения магнитного материала	Коэрцитивная сила, кЭ	
	Без термообработки	После термообработки
Выплавка исходного сплава в индукционной печи с последующей разливкой в щелевые изложницы	5,0	5,7
Экстракция расплава из секционного кристаллизатора	9,8	14,0

ры, обуславливающей значительное улучшение многих физико-механических характеристик. Так, например, коэрцитивная сила магнитного сплава системы Nd-Fe-B возросла более чем в два раза, по сравнению со сплавом, получаемым традиционными способами (табл. 2).

Металлографические исследования позволили установить, что ПЧФ имеют структуру, близкую к рентгеноаморфной. Загрязнения металла посторонними примесями в процессе плавки и диспергирования не обнаружены.

Быстрозакаленный чешуйчатый материал достаточно технологичен, его можно измельчать в мельницах и в дальнейшем прессовать и спекать в изделия заданной формы.

Таким образом, обобщение и анализ полученных результатов свидетельствует о том, что ИПСК наряду с известными переплавными процессами специальной электрометаллургии характеризуется рядом положительных технологических особенностей, реализация которых в промышленных условиях позволяет создавать новые прогрессивные технологии получения и рафинирования металлопродукции и утилизации отходов, а также процессы получения новых металлических материалов.

1. Глуханов Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева. Вып. 1. — Л.: Машиностроение, 1979. — 60 с.
2. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунер. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 328 с.
3. Шаповалов А. Н., Бодажков В. А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. — Л.: Машиностроение, 1974. — 263 с.
4. Вологдин В. В. Пайка и наплавка при индукционном нагреве. — М.; Л.: Машиностроение, 1965. — 112 с.
5. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1968. — 496 с.
6. Иванов В. Н. Высокочастотная сварка — ресурсосберегающая технология современного производства // Автомат. сварка. — 1983. — № 9. — С. 40-48.
7. Рыскин С. Е., Смирнов В. М., Благовеценский Г. В. Оборудование для индукционной термообработки. — М.; Л.: Машиностроение, 1966. — 158 с.

8. Большая советская энциклопедия. 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия. — 1973. — Т. 14. — 1982 с.
9. Глуханов Н. П., Богданов В. Н. Сварка металлов при высокочастотном нагреве. — М.; Л.: Машгиз, 1962. — 190 с.
10. Головнева М. А., Атрошенко А. П. Оборудование и технология горячей штамповки // Учебник для машиностроительных техникумов. — М.; Л.: Машгиз, 1962. — 368 с.
11. Безручко И. В. Индукционный нагрев для объемной штамповки. — Л.: Машиностроение, 1987. — 127 с.
12. Башенко В. В., Донской А. В., Соломахин И. М. Электроплавильные печи цветной металлургии. — М.: Металлургия, 1971. — 320 с.
13. Цыганов В. А. Плавка цветных металлов в индукционных печах. — М.: Металлургия, 1974. — 248 с.
14. Простяков А. А. Индукционные печи и миксеры для плавки чугуна. — М.: Энергия, 1977. — 216 с.
15. Губченко А. П. Плавка и кристаллизация расплава в электромагнитном поле на опоре // Магнитная гидродинамика. — 1986. — № 1. — С. 132-133.
16. Артышевский П. П., Кравецкий Д. Я., Затуловский Л. М. Исследование процесса выращивания профилированных кристаллов кремния с пьедестала // Изв. АН СССР. Сер. физическая. — 1971. — № 3. — С. 469-472.
17. Ливанов В. А., Габидуллин Р. М., Шитлов В. С. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1977. — 168 с.
18. Лакомский В. И. Методика изучения растворимости водорода в жидких металлах в широком температурном интервале // Газы в литом металле. — М.: Наука, 1964. — С. 254-259.
19. Азот в жидких высокорекреационных металлах и сплавах / Г. М. Григоренко, Ю. М. Помарин, В. Ю. Орловский, В. В. Лакомский. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2003. — 153 с.
20. Фогель А. А. Индукционный метод удержания металлов во взвешенном состоянии / Под ред. А. Н. Шамова. — Л.: Машиностроение, 1979. — 104 с.
21. Ратников Д. Г. Бестигельная зонная плавка. — М.: Металлургия, 1976. — 224 с.
22. Быдлин В. М., Добровольская В. И., Ратников В. Г. Индукционный нагрев при производстве особо чистых материалов / Под ред. А. Н. Шамова. — Л.: Машиностроение, 1980. — 65 с.
23. Фокин Н. И., Тур Л. Л., Вертман А. А. Использование индукционных плавильных устройств с холодными тиглями и электромагнитным обжатием расплава для высокотемпературных физико-химических исследований // Электротермия. — 1971. — Вып. 10. — С. 20-22.
24. Тур Л. Л., Фокин Р. И. Современные методы индукционной плавки. Библиотека электротермиста. — Вып. 59. — М.: Энергия, 1975. — 110 с.
25. Петров Ю. В., Ратников Л. Г. Холодные тигли. — М.: Металлургия, 1972. — 112 с.
26. Тур Л. Л., Губченко А. П. Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. — М.: Энергоиздат, 1988. — 120 с.
27. Савицкий В. М., Бурханов Г. С., Бондаренко К. П. Развитие плазменных методов выращивания монокристаллов тугоплавких металлов и сплавов // Монокристаллы тугоплавких и редких металлов, сплавов и соединений. — М.: Наука, 1976. — С. 6-10.
28. Бауэр В. Х., Филд В. Г. Метод Вернейля // Теория и практика выращивания кристаллов. — М.: Металлургия, 1968. — С. 471-485.
29. Применение холодной секционированной стенки при плазменно-индукционном нагреве / Ю. В. Латаш, В. А. Шаповалов, И. В. Шейко и др. // Пробл. спец. электроталлургии. — 1993. — № 1. — С. 92-94.

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

Поступила 07.10.2008