

УДК 669.187.58:620.192.47

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ. ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ Часть 3. Индукционный переплав в секционном кристаллизаторе

И. В. Шейко, Г. М. Григоренко

Даны обзор и анализ возможностей и практического применения опытно-промышленных установок для индукционного переплава в секционном кристаллизаторе (ИПСК) и технологии рафинирующего переплава отходов различных металлов и сплавов. Показано, что механизм передачи энергии электромагнитного поля к загрузке отличается от обычного индукционного нагрева, поскольку между индуктором и загрузкой расположена охлаждаемая стенка секционного кристаллизатора, которая искажает электромагнитное поле в плавильной зоне и выполняет роль индуктора для загрузки. Характерной особенностью процесса ИПСК является отжатие металлического расплава от стенки кристаллизатора в зоне, ограниченной высотой индуктора. Благодаря этому резко снижаются тепловые потери, а интенсивная циркуляция расплава обеспечивает выравнивание температуры и химического состава в объеме ванны, способствует выносу на поверхность расплава неметаллических включений и газовых примесей.

Review and analysis of capabilities and practical application of experimental-industrial installations for induction remelting in a sectional mould (IRSM) and technology of refining remelting of wastes of different metals and alloys are presented. It is shown that the mechanism of transfer of electromagnetic field energy to the charge is differed from conventional induction heating as a water-cooled wall of the sectional mould is located between the inductor and charge, that distorts the electromagnetic field in the melting zone and plays a role of an inductor for the charge. The IRSM process is characteristic of pressing out the metallic melt from the mould wall in the zone limited by the inductor height. Owing to this, the heat losses are drastically reduced, and the intensive circulation of the melt promotes the equalizing of temperature and chemical composition in the pool volume, contributes to the escape of non-metallic inclusions and gas impurities to the melt surface.

Ключевые слова: индукционный переплав; секционный кристаллизатор; индуктор; неметаллические включения

Важнейшим достоинством переплавных процессов специальной электрометаллургии является получение слитка в охлаждаемом кристаллизаторе путем его последовательной вертикально направленной кристаллизации, создающей благоприятные условия для рафинирования расплава, подавления процессов ликвации легирующих элементов и предотвращения образования усадочной раковины.

Первые сведения о переплаве металлической расходуемой заготовки в высокочастотном электромагнитном поле с одновременным формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе относятся к середине XX столетия [1]. Принципиальная схема одного из первых вариантов процесса индук-

ционного переплава расходуемой заготовки представлена на рис. 1.

Расходуемая цилиндрическая заготовка подается сверху в многовитковый цилиндрический индуктор таким образом, чтобы ее нижний конец находился в индукторе. Внизу, соосно индуктору, установлен охлаждаемый поддон, который при помощи штока механизма вытягивания может перемещаться вдоль оси кристаллизатора. Под действием высокочастотного электромагнитного поля, создаваемого индуктором, происходит оплавление нижнего конца расходуемой заготовки и жидкий металл в виде капли попадает в кристаллизатор.

Однако, как отмечают авторы, получить плотный однородный слиток им не удалось из-за того, что обогрев металла в кристаллизаторе отсутствовал. В результате капли металла в кристаллизаторе

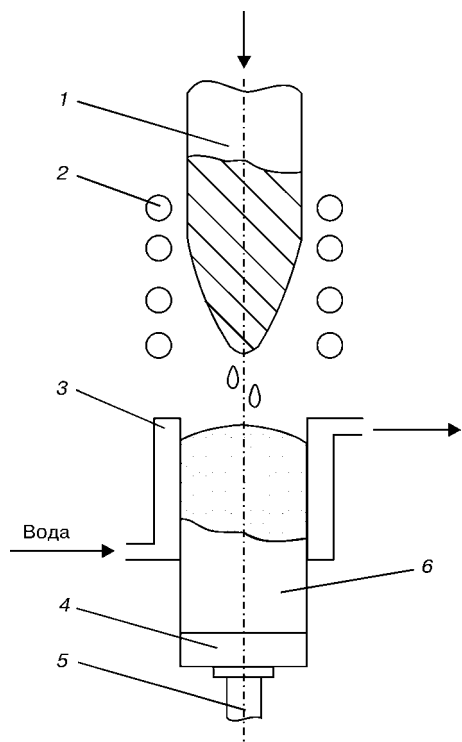


Рис. 1. Схема индукционного переплава расходуемой заготовки с получением слитка в охлаждаемом кристаллизаторе [1]: 1 — расходуемая заготовка; 2 — индуктор; 3 — кристаллизатор; 4 — поддон; 5 — шток механизма вытягивания слитка; 6 — слиток

не образовывали жидкую ванну, а сваривались между собой в твердом состоянии, превращаясь в некий конгломерат. Поэтому данный метод не нашел практического применения.

Несколькими годами позже в СССР был опробован метод индукционного переплава расходуемой заготовки с одновременным формированием слитка в литейной форме, в которой поступающий в виде капель жидкий металл накапливался и поддерживался в жидком состоянии при помощи второго индуктора [2]. Схема опытной установки, работающей на этом принципе, представлена на рис. 2.

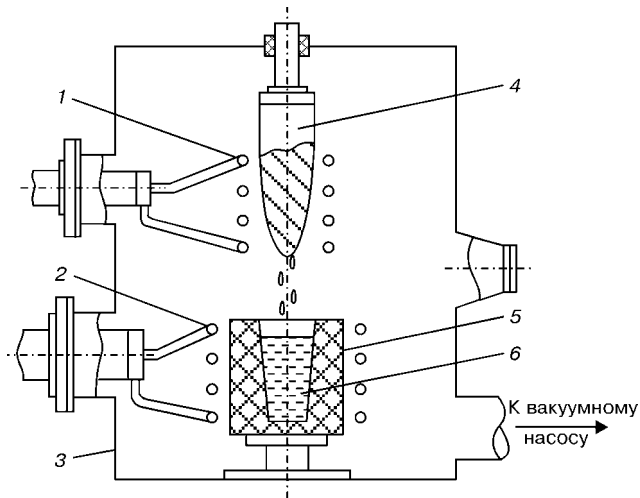


Рис. 2. Схема установки для индукционного переплава расходуемой заготовки и получения отливки в литейной изложнице [2]: 1 — верхний индуктор; 2 — нижний индуктор; 3 — плавильная камера; 4 — расходуемая заготовка; 5 — литейная форма; 6 — жидкий металл

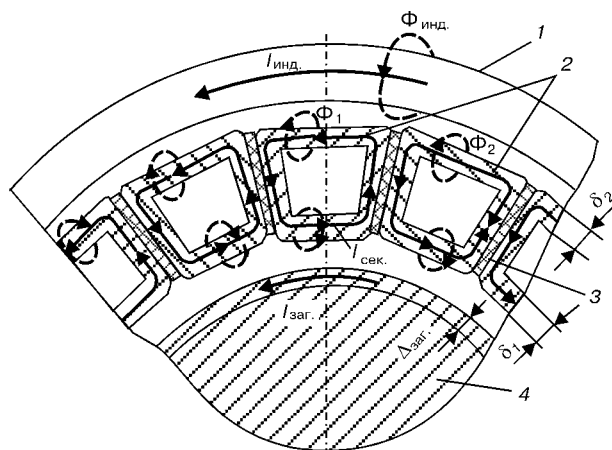


Рис. 3. Схемы протекания токов в элементах системы индуктор — кристаллизатор — загрузка и вероятная картина магнитных полей в этой системе: 1 — индуктор; 2 — секции кристаллизатора; 3 — диэлектрическая прокладка; 4 — загрузка. $I_{инд}$ — ток индуктора; $I_{сек}$ — ток секций; $I_{зар}$ — ток загрузки; $\Delta_{зар}$ — глубина проникновения тока в садке; δ_1 и δ_2 — толщина стенок секций внутренней и наружной соответственно; $\Phi_{инд}$ — магнитный поток, создаваемый током индуктора; Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки, создаваемые токами секций

Отличительной особенностью этой установки является то, что она оснащена двумя цилиндрическими индукторами, установленными в герметичной плавильной камере соосно друг другу. Верхний индуктор служит для оплавления металлической расходуемой заготовки, нижний индуктор — для обогрева и перемешивания металла в форме. В верхний индуктор вводится нижний конец расходуемой заготовки, где происходит ее оплавление. Жидкий металл с расходуемой заготовки каплями поступает в изложницу. Электромагнитное поле, создаваемое нижним индуктором, перемешивает поступающий в форму жидкий металл. Это позволило авторам получить достаточно плотные слитки с мелкозернистой структурой.

Однако описанный метод и установка не нашли практического применения из-за сложности и высокой стоимости комплектующей аппаратуры (два источника питания, два индуктора и др.) и низкой производительности.

Общим недостатком двух рассмотренных методов индукционного переплава расходуемой заготовки является разрыв тепловых процессов, протекающих в зоне плавления расходуемой заготовки и в металлической ванне. Объединить тепловые процессы в плавильной зоне можно, только используя секционный кристаллизатор, «прозрачный» для электромагнитного поля, создаваемого индуктором.

В настоящее время разработаны и на практике реализованы процессы индукционной плавки металлов и сплавов с формированием слитка в секционном охлаждаемом кристаллизаторе [3–9]. Индуцированные в секциях кристаллизатора токи в зоне индуктора создают вторичное электромагнитное поле, в котором происходит расплавление порций шихты или расходуемой заготовки и наведение металлической ванны, верхняя часть которой отжа-



та в зоне индуктора от стенки кристаллизатора. При этом внутренние стенки секций кристаллизатора выполняют роль индуктора для расплава, который находится в плавильной зоне (рис. 3) [10]. Кроме того, через межсекционные зазоры в плавильную зону поступает ток индуктора, создающий электромагнитное поле. В результате взаимодействия токов, протекающих в системе индуктор–кристаллизатор–загрузка, процесс ИПСК сопровождается отжигом металлического расплава от стенки кристаллизатора в зоне индуктора и интенсивным перемешиванием металла. Результаты калориметрирования показали, что электрический КПД этой системы составляет 32...43 %, т. е. в загрузке выделяется $(0,32... 0,43) P_{\text{инд}}$ (где $P_{\text{инд}}$ — электрическая мощность, подводимая к индуктору).

Перемешивание металлической ванны в сочетании с отсутствием контакта ее с охлаждаемой стенкой кристаллизатора является важнейшим технологическим достоинством этого процесса, обеспечивающим выравнивание температуры и химического состава в объеме ванны, что 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, которые порционно подают по ходу плавки в металлическую ванну, или расходуемая заготовка с заданным химическим составом.

Выплавка слитков в секционном кристаллизаторе выполняется по двум схемам: с вытягиванием слитка по ходу плавки и путем наплавления последнего в глухонном кристаллизаторе (рис. 4). К достоинствам схемы с вытягиванием слитка можно отнести небольшую металлоемкость кристаллизатора, компактность плавильного узла, что позволяет разместить его в герметичной плавильной камере и вести плавку в широком диапазоне давления и состава газовой атмосферы.

В работе [7] описана конструкция опытной установки с секционным кристаллизатором диаметром 125 мм, работающей по схеме вытягивания слитка, и приведены данные о качестве титановых слитков, выплавленных из кусковой шихты. Схема этой установки приведена на рис. 5.

Установка имеет герметичную плавильную камеру, в которой размещены секционный кристаллизатор и многovitковый цилиндрический индуктор. В секционный кристаллизатор снизу входит охлаждаемый поддон, закрепленный на вертикаль-

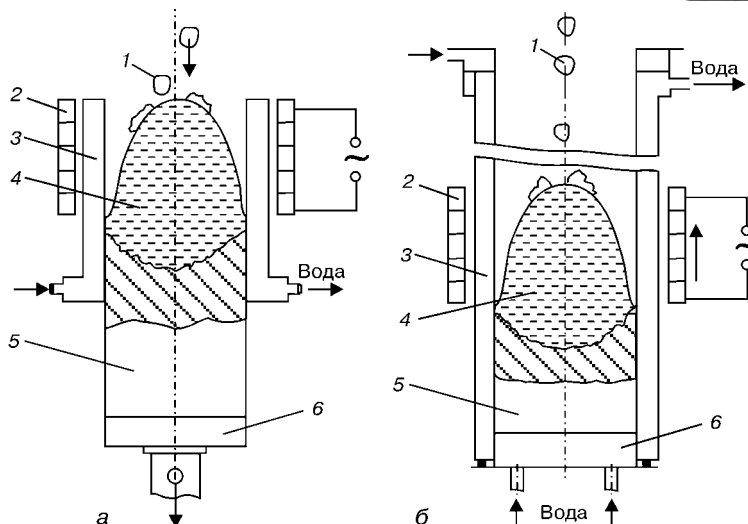


Рис. 4. Схемы индукционного переплава в секционном кристаллизаторе: а — с вытягиванием слитка; б — с наплавлением слитка в глухонном кристаллизаторе; 1 — шихта; 2 — индуктор; 3 — секционный кристаллизатор; 4 — металлическая ванна; 5 — слиток; 6 — поддон

ном штоке механизма вытягивания слитка. Сыпучая шихта загружается в бункер, откуда при помощи дозирующего устройства может порционно или непрерывно подаваться в кристаллизатор в процессе плавки.

Одновременно с металлической шихтой подается бескислородный флюс CaF_2 , который, расплавляясь, образует в зоне индуктора кольцевую шлаковую ванну, из которой на стенке кристаллизатора формируется гарнисаж. Этот гарнисаж предотвращает пережигание секций кристаллизатора жидким металлом в зоне индуктора. В процессе плавки слиток вытягивают из кристаллизатора.

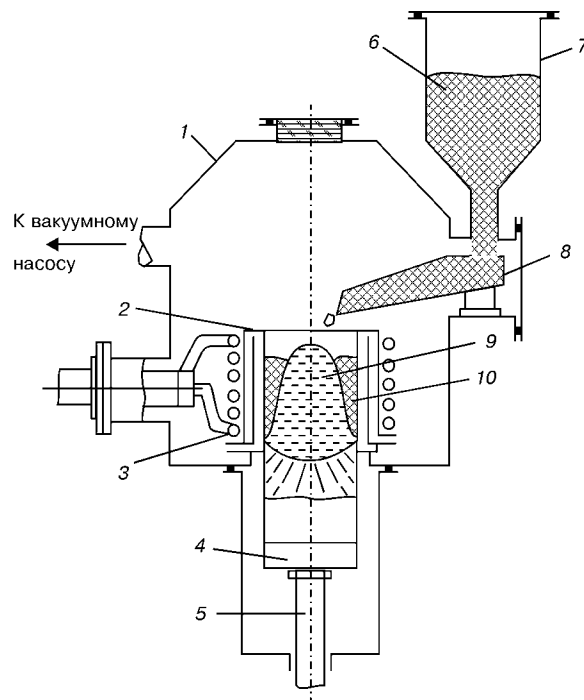


Рис. 5. Схема установки для индукционного переплава кусковой шихты с формированием слитка в секционном кристаллизаторе [7]: 1 — плавильная камера; 2 — секционный кристаллизатор; 3 — индуктор; 4 — поддон; 5 — шток механизма вытягивания слитка; 6 — кусковая шихта; 7 — бункер; 8 — дозатор; 9 — металлическая ванна; 10 — шлаковая ванна



Таблица 1. Основные технические характеристики установок ИПСК с наплавлением слитка в глухдонном кристаллизаторе

Технический параметр	Индекс проектной документации		
	ОП-117	ОП-151	ОП-154
Диаметр секционного кристаллизатора, мм	225	125; 150	80
Длина слитка, мм	600	800	300
Масса слитка, кг	До 100 (по Ti)	До 100 (по Ti)	30 (по Pt)
Диаметр расходуемой заготовки, мм	210...215	—	—
Длина расходуемой заготовки, мм	До 1200	—	—
Количество секций в кристаллизаторе, шт.	24	24	16
Скорость перемещения кристаллизатора, мм/мин.:			
рабочая	2... 18	2... 20	3... 50
маршевая	100... 300	100	—
Скорость перемещения расходуемой заготовки, мм/мин.:			
рабочая	2... 12	—	—
маршевая	100... 200	—	—
Тип ВЧ источника питания	ВГО-500/250	ППЧВ-500/10,0	ППЧВ-250/8 или ВЧГ-3-160/066
Расход защитного газа на одну плавку, м ³	1,0... 1,5	0,7... 1,5	0,3
Производительность при двухсменной работе, т/год	До 60	До 50	2,0
Расход охлаждающей воды (без источника питания), м ³ /ч	5,0... 6,0	5,0... 6,0	1,5... 2,0

Установка оснащена машинным генератором мощностью 100 кВт, вырабатывающим переменный ток частотой 10 кГц.

Сравнение качества титана, выплавленного индукционным методом, с металлом вакуумно-дуговой плавки показало, что в слитках индукционной выплавки содержание таких примесей, как кислород, азот и водород несколько выше. По мнению авторов, это обусловлено переходом этих примесей в жидкий металл из шлаковой ванны. Соответственно выше были твердость, пределы прочности и текучести, а ударная вязкость была ниже, чем в титане ВДП.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины в конце 70-х начале 80-х годов был разработан процесс индукционного переплава с формированием слитка в секционном охлаждаемом кристаллизаторе. Суть его заключается в том, что при помощи индуктора ограниченной высоты (высота индуктора составляет $0,7... 1,5 D_{кр}$) внутри кристаллизатора создается высокочастотное электромагнитное поле, в котором осуществляется оплавление расходуемой заготовки или порционно подаваемой шихты и формирование металлической ванны. По мере наплавления слитка, т. е. по мере

наполнения кристаллизатора, плавильная зона перемещается снизу вверх со скоростью, равной линейной скорости наплавления слитка [11]. Перемещение электромагнитного поля вдоль кристаллизатора может осуществляться либо путем движения вверх индуктора, либо путем опускания кристаллизатора относительно индуктора.

При плавке в глухдонном кристаллизаторе нет взаимного перемещения слитка и кристаллизатора, что позволяет выплавлять слитки с хорошим качеством поверхности независимо от физико-механических свойств металла или сплава.

Применение глухдонных кристаллизаторов обусловлено тем, что есть ряд металлов и сплавов, имеющих низкую пластичность даже при высоких температурах, а также сплавы с широким интервалом кристаллизации. Выплавка слитков из таких материалов сопряжена с определенными трудностями, поскольку при вытягивании по ходу плавки возможен их разрыв или образование поперечных трещин.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработано несколько типов плавильных индукционных установок, в которых реализуется схема наплавления слитка в глухдонном кристаллизаторе.

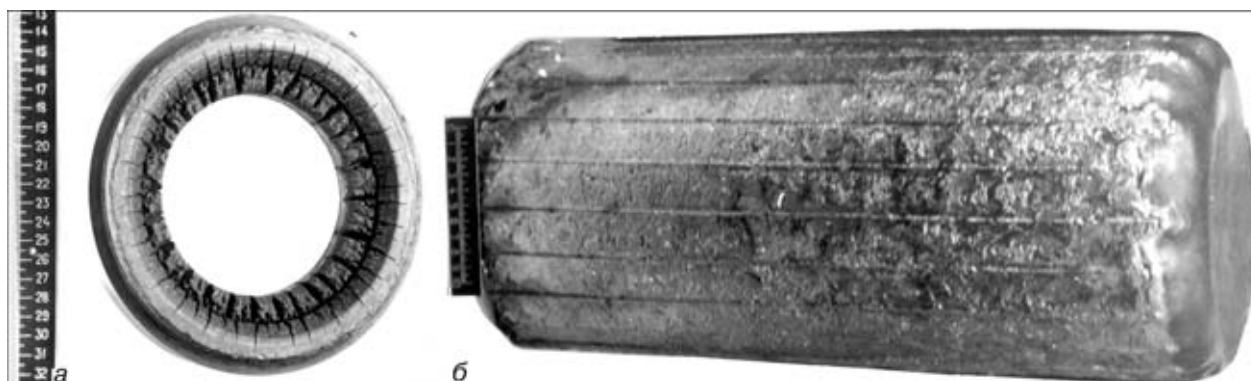


Рис. 6. Общий вид одного из отработанных фланцев из титанового сплава ОТ4-2 (а) и выплавленного из них слитка (б)



Таблица 2. Химический состав ванадийсодержащей лигатуры

Металл	Содержание основных элементов, %			Содержание примесей, %			
	V	Ti	C	Si	Fe	Cu	[O]
Исходный	50,89	6,9	2,1	0,31	0,58	0,20	0,20... 0,23
После ИПСК в среде аргона	50,60... 52,70	6,8... 6,9	2,1... 2,3	0,27	0,33	0,09	0,025... 0,020
То же в среде аргона с флюсом	49,40... 50,57	6,8... 6,9	2,0... 2,3	0,25	0,24	0,08	0,018... 0,021
Регламент по ТУ 48-4-441-83	47... 53	6... 9	1,8... 3,5	0,25... 0,50	0,4... 0,8	0,12... 20	—

Примечание. Легирующим элементом лигатуры является алюминий.

Они рассчитаны на переплав различных металлов и сплавов, включая платину и ее сплавы, титан, редкоземельные металлы и др. Основные технические характеристики таких плавильных установок приведены в табл. 1 [12].

Отличительная особенность установок этого типа состоит в том, что их секционный кристаллизатор одновременно выполняет роль плавильной камеры. Независимый источник тепла при ИПСК позволяет достаточно гибко управлять процессом кристаллизации слитка, что особенно важно для формирования структуры его головной части. Изменяя мощность, подводимую к индуктору на завершающем этапе плавки, можно обеспечить практически полное выведение усадочной раковины в головной части слитка. Кристаллическое строение и макроструктура слитков ИПСК аналогична слиткам известных переплавных процессов (ВДП, ЭСП, ЭЛП и ПДП).

В Институте электросварки им. Е. О. Патона за последние 15–20 лет проведен большой комплекс научно-исследовательских, технологических и проектно-конструкторских работ, который позволил определить основные параметры процесса ИПСК, оценить качество выплавляемого металла и создать ряд плавильных агрегатов, которые в разное время успешно прошли опытно-промышленную проверку или были внедрены в различных отраслях промышленности.

Так, внедренная на ПО «Киевтрактородеталь» технология индукционного переплава элементов ли-

тейной оснастки из титанового сплава ОТ4–2 [13] в свое время полностью решила проблему вовлечения в технологический металлооборот образующихся на предприятии титановых отходов. Выплавляемые из отходов слитки диаметром 220 мм в дальнейшем использовались для изготовления новых деталей литейной оснастки машин центробежного литья гильз (рис. 6).

Весьма эффективными оказались разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона и внедренные на Ленинабадском комбинате редких металлов (республика Таджикистан) опытно-промышленная установка ОП-151 и технология рафинирования отходов ванадийсодержащей лигатуры АВТУ (47... 53 % V) [14]. Производимая алюмотермическим способом лигатура имеет ряд недостатков — высокая загрязненность неметаллическими включениями, их неравномерное распределение в объеме слитка и повышенное содержание кислорода. В результате до 35 % лигатуры отбраковывается (около 25 т в год). В процессе ИПСК отходов происходит ощутимое удаление крупных неметаллических включений, кислорода, а также примесей железа и меди (табл. 2, рис. 7). Применение бескислородного флюса CaF₂ оказывает благоприятное влияние на качество поверхности выплавляемых слитков и способствует более глубокому рафинированию металла.

Не менее эффективна технология рафинирования черновых редкоземельных металлов, которая

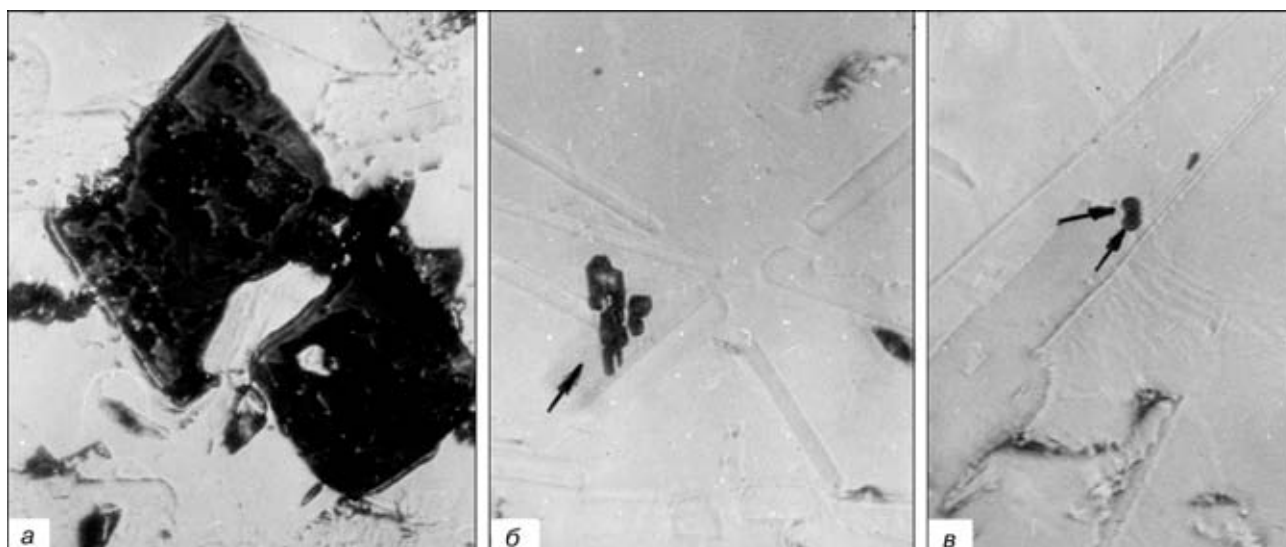


Рис. 7. Неметаллические включения в лигатуре АВТУ: а — исходный металл; б — после ИПСК в среде аргона; в — после ИПСК с добавкой флюса CaF₂

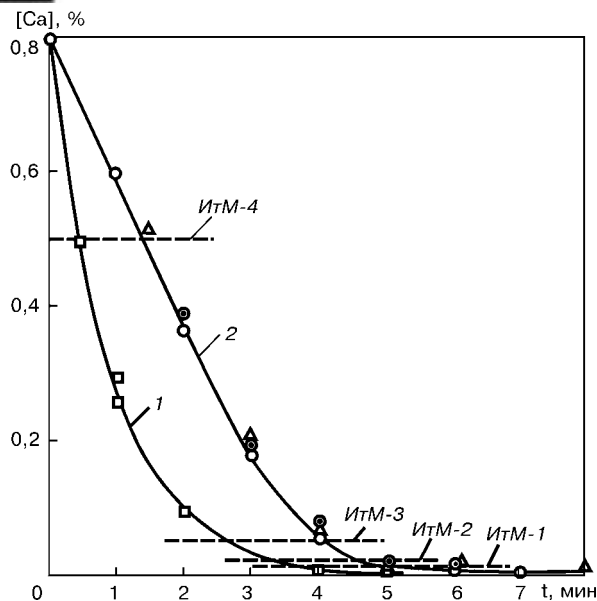


Рис. 8. Изменение содержания кальция в черновом иттрии при ИПСК: 1 — давление в плавильной камере 50,5 кПа; 2 — то же 101,0 кПа. Штриховые линии — предельное содержание кальция в иттрии (ТУ 48-4-208-72)

была внедрена на Киргизском горнометаллургическом комбинате (республика Киргизия) [15]. Наиболее распространенным промышленным методом получения большинства РЗМ является металлотермическое восстановление, сырьем для которого служат фториды этих металлов, восстановителем — металлы, имеющие высокое химическое сродство к кислороду (кальций, алюминий, бор и др.). Процесс восстановления осуществляют в индукционных печах с танталовыми тиглями. Черновые РЗМ содержат значительное количество кальция (от 0,7 до 2,0 %), поэтому после металлотермического восстановления их подвергают рафинирующему переплаву в электродуговых гарнисажных печах с нерасходуемым вольфрамовым электродом в атмосфере аргона. Удаление избыточного кальция происходит путем его испарения в зоне анодного пятна электрической дуги. Этот процесс достаточно длительный и энергоемкий, удельный расход электроэнергии достигает 6... 9 кВт·ч/кг.

Интенсивное перемешивание металлической ванны при ИПСК и ее развитая куполообразная открытая поверхность способствуют весьма интенсивному испарению кальция из жидкого металла (рис. 8). Процесс отгонки кальция при ИПСК протекает в 4–6 раз быстрее, чем при плавке в электродуговой гарнисажной печи.

Технология и установки для ИПСК промышленных отходов платины и сплавов на ее основе были

внедрены на Екатеринбургском заводе по обработке цветных металлов (Россия) и Харьковском государственном предприятии «Рубин» [16, 17].

Традиционной областью применения платины и сплавов на ее основе является производство химической посуды, тиглей для варки оптического стекла и фильтрных тиглей для получения стекловолокна. На предприятиях, производящих и эксплуатирующих изделия из платины, образуется достаточно большое количество отходов в виде обрезки, стружки, лома и пр. Разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона плавильные установки и технология переплава этих отходов позволяют выплавлять слитки более чистые по сравнению с открытой индукционной плавкой. После ИПСК содержание таких примесей, как железо и свинец снижается с 0,01 до 0,006 % и с 0,012 до 0,007 % соответственно. Распределение родия в высоколегированных сплавах платины после ИПСК достаточно равномерное (табл. 3). Плотность металла несколько выше, чем металла открытой индукционной плавки. ИПСК отходов платины характеризуется сравнительно невысоким расходом электроэнергии, составляющим 2,5... 3,0 кВт·ч/кг.

Таким образом, в настоящем обзоре [18, 19] мы коснулись сравнительно узкого круга применения индукционного источника нагрева, а именно для плавки электропроводных материалов (металлов и сплавов), и не рассматривали такие широко известные процессы, основанные на индукционном нагреве, как термообработка, сварка и пайка, получение полупроводниковых материалов, химические технологии и т. д.

И тем не менее, рассмотренные в обзоре различные виды и методы плавки свидетельствуют о широких технологических возможностях индукционного источника нагрева: во-первых, он не оказывает негативного влияния на состав и свойства нагреваемых материалов; во-вторых, обеспечивает интенсивное перемешивание расплава, что способствует гомогенизации последнего по температуре и составу; в-третьих, отсутствует локальный перегрев расплава, благодаря чему обеспечивается низкий угар легирующих элементов, имеющих высокую упругость пара; в-четвертых, отсутствует жесткая связь между подводимой электрической мощностью и скоростью плавки, что позволяет выдерживать металлический расплав в жидком состоянии длительное время и, в-пятых, индукционный источник нагрева не требует создания каких-либо специальных условий для его работы и поэтому технологический процесс можно вести в газовой атмосфере любого состава и давления, в том числе и в вакууме.

С учетом реализации отмеченных возможностей индукционного источника нагрева и решаемых задач на лабораторном уровне и в промышленных масштабах создано огромное количество плавильных устройств и агрегатов, позволяющих расплавлять и на-

Таблица 3. Распределение родия в слитках ИПСК

Марка сплава	Высота слитка, мм	Содержание родия по высоте слитков, %			Регламент по ТУ
		Низ	Середина	Верх	
ПлРд7	250	6,87... 6,96	6,85... 6,89	6,83... 6,92	6,7... 7,3
ПлРд10	245	9,97... 10,11	9,91... 9,95	9,88... 9,96	9,7... 10,3
ПлРд20	230	19,82... 19,90	19,85... 19,93	19,83... 19,95	19,6... 20,4



капливать металл в жидком состоянии массой от нескольких граммов до нескольких десятков тонн.

Широкое промышленное применение находят тигельные индукционные печи открытого типа и с герметичной плавильной камерой, в которой можно создавать как вакуум, так и избыточное давление с заданным составом газовой среды. В индукционных тигельных печах выплавляется практически весь сортament сплавов на основе железа и никеля, а также многие цветные металлы и сплавы на их основе, например медь и ее сплавы. Однако как сами индукционные печи, так и технологии плавки в них нуждаются в дальнейшем совершенствовании, поскольку начальный период плавки имеет низкий КПД и весьма энергозатратен. Один из путей дальнейшего совершенствования этих агрегатов — создание плавильных комплексов с гибридным нагревом, например сочетание индукционного и дугового или плазменно-дугового нагрева. И тому немало примеров у нас в стране и за рубежом.

Достаточно широко в промышленных масштабах используются каналные индукционные печи, главным образом для выплавки сплавов на основе меди, а также цинка и алюминия. Канальные печи так же, как тигельные, нуждаются в их дальнейшем техническом и технологическом совершенствовании.

В последние годы возрос интерес к выплавке и переплаву металлов и сложнoleгированных сплавов в индукционных плавильных агрегатах с так называемым холодным тиглем (процесс ИПХТ) и охлаждаемым секционным кристаллизатором. Эти процессы и плавильные агрегаты выгодно отличаются от известных тигельных и каналных печей, поскольку в них отсутствует один из основных источников загрязнения металлического расплава — огнеупорный тигель. Однако на этом этапе своего развития они проигрывают в энергетике, что является огромным резервом в их дальнейшем совершенствовании и развитии. Накопленный в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины опыт создания и промышленной эксплуатации плавильных агрегатов и технологий, основанных на процессе ИПСК, позволяет нам сделать вывод о том, что этот процесс может весьма успешно применяться в промышленных масштабах наряду с другими переплавными процессами, о чем свидетельствуют приведенные в обзоре результаты его опытно-промышленного применения.

1. Грубер Г. Плавка металлов электронным лучом. — М.: Изд-во иностр. лит. — 1963. — 69 с.
2. А. с. 133593 СССР. МКИ H05B 5/56. Бестигельное вакуумное индукционное устройство / З. А. Орешников, В. П. Гречин, Б. Ф. Милыев, С. Д. Сальников Заявл. 25.11.60 // Бюл. Открытия. Изобрет. — 1960. — № 22. — С. 24.

3. Тур Л. Л., Фокин Н. И. Современные методы индукционной плавки // Библиотека электротермиста. Вып. 59. — М.: Энергия, 1975. — 110 с.
4. 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.
5. Петров Ю. Б., Ратников Д. Г. Холодные тигли. — М.: Металлургия. 1972. — 112 с.
6. Тур Л. Л., Губченко А. П. Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. — М.: Энергоиздат, 1988. — 120 с.
7. Shipperleit G. H., Zetherman A. F., Evers D. H. Cold-crucible induction melting of reactive metals // J. of Metals. — 1961. — 13, N 2. — P. 140–144.
8. Experimental measurements and theoretical analysis of induction heating by use of a conductive crucible / K. Sassa, M. Kuwabara, T. Yasuda, S. Asai // Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. — 1991. — 77, N 9. — P. 62–69.
9. Клайтс П., Билл Р. Выплавка слитков и фасонных отливок методом индукционно-шлаковой плавки // Электрошлаковый переплав. — Киев: Наук. думка, 1977. — С. 264–274.
10. Некоторые особенности индукционной плавки в секционном кристаллизаторе. Часть 2 / И. В. Шейко, Г. А. Высоцкий, Ю. В. Латаш, Ю. Д. Яворский // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 1. — С. 93–98.
11. Шейко И. В. Новые технологии и оборудование для индукционной плавки металлов и сплавов: Дис. ... д-ра техн. наук / АН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. — Киев, 2003. — 362 с.
12. Латаш Ю. В., Шейко И. В., Константинов В. С. Плавка высокорекреакционных, благородных и редкоземельных металлов в плазменных и индукционных установках с холодным тиглем-кристаллизатором // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — Киев.: Наук. думка, 1990. — С. 281–285.
13. Индукционный переплав в секционном кристаллизаторе, возможности и перспективы его применения для переплава титановых отходов / Ю. В. Латаш, И. В. Шейко, В. Н. Бернадский и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1986. — № 2. — С. 64–70.
14. Рафинирующий переплав отходов ванадийсодержащей лигатуры / И. В. Шейко, Ю. В. Латаш, В. Н. Высоцкий и др. // Там же. — 1992. — № 3. — С. 80–83.
15. Дистилляционное рафинирование черного иттрия при индукционном переплаве в секционном кристаллизаторе (ИПСК) / И. В. Шейко, Ю. В. Латаш, В. Н. Высоцкий и др. // Там же. — 1991. — № 3. — С. 76–80.
16. О применении индукционного переплава в секционном кристаллизаторе для утилизации отходов платиновых сплавов / И. В. Шейко, Н. И. Тимофеев, В. А. Дмитриев и др. // Там же. — 1990. — № 2. — С. 96–99.
17. Производство в Украине изделий промышленного назначения из лома платины и сплавов на ее основе (Утилизация и рафинирование лома) / В. Ф. Зеленский, И. М. Неклюдов, В. И. Лапшин и др. // Там же. — 2001. — № 2. — С. 38–43.
18. Шейко И. В., Григоренко Г. М. Индукционный нагрев. Возможности и перспективы применения в процессах специальной электрометаллургии. Ч. 1. Классификация способов индукционной плавки металлов и сплавов, способы бестигельной плавки // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 2. — С. 26–33.
19. Шейко И. В., Григоренко Г. М. Индукционный нагрев. Возможности и перспективы применения в процессах специальной электрометаллургии. Ч. 2. Методы и оборудование для индукционной плавки металлов с контактом расплава со стенкой тигля // Там же. — № 4. — С. 36–43.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 21.01.2004