



БИБЛИОТЕЧКА
ВЫСОКОЧАСТОТНИКА-
ТЕРМИСТА

Ю. Б. ПЕТРОВ
И. А. КАНАЕВ

ИНДУКЦИОННЫЕ
ПЕЧИ ДЛЯ
ПЛАВКИ ОКСИДОВ



БИБЛИОТЕЧКА
ВЫСОКОЧАСТОТНИКА-
ТЕРМИСТА

Основана в 1954 году

Выпуск 5

Ю. Б. ПЕТРОВ
И. А. КАНАЕВ

ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ ОКСИДОВ

Под редакцией
канд. техн. наук А. Н. Шамова

Дорогие друзья!
Государу —
С земли дружбы и счастья —
Бывшему руководству земли
ИПХГ на новое будущее!
ЛЕНИНГРАД
"ПОЛИТЕХНИКА"
1991

17.6.92.

L. Петров.

ББК 34.651-5
П30
УДК 621.365.5 : 621.745.5 : 666.792.2

Петров Ю. Б., Канаев И. А.

П30 Индукционные печи для плавки оксидов/ Под ред.
А. Н. Шамова. — Л.: Политехника, 1991. — (Б-ка вы-
сокочастотника-термиста; Вып. 5). — 56 с.; ил.
ISBN 5-7325-0019-7

В книге описан новый способ плавки оксидных материалов с вы-
сокой температурой плавления — индукционная плавка в холодных
тигелях, исключающая загрязнение расплава материалом тигля. Ука-
заны особенности процесса и методика его реализации. Рассмотрены
техника индукционной плавки оксидов, промышленное и лабораторное
оборудование, опыт его эксплуатации, методы управления и регули-
рования, техника безопасности. Даны методики расчета печей, в том
числе и с привлечением ЭВМ, примеры технологических процессов.

Книга рассчитана на технологов и конструкторов, занимающихся
технологией новых материалов.

П 2704070000—247 247—91
045 (01)—91

ББК 34.651-5

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

ПЕТРОВ Юрий Борисович. КАНАЕВ Игорь Алексеевич.

ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ ОКСИДОВ

Редактор Е. М. Миронченкова. Художественный редактор А. Н. Волкогонова.
Технический редактор Т. М. Жилич. Обложка художника А. Г. Угница. Кор-
ректор Н. В. Соловьева.

ИБ № 5586

Сдано в набор 01.02.91. Подписано в печать 05.04.91. Формат 60×90¹/16.

Бумага типографская. Гарнитура литературная. Печать высокая.

Усл. печ. л. 3,5. Усл. кр.-отт. 3,75. Уч.-изд. 3,35. Тираж 1500 экз.

Заказ 189. Цена 2 р.

Издательство «Политехника». 191065. Ленинград, ул. Дзержинского, 10.
Типография ЛЭИС, 198320, Ленинград, ул. Свободы, 31.

ISBN 5-7325-0019-7

© Ю. Б. Петров, И. А. Канаев, 1991

ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди высокотемпературных материалов оксиды занимают особое место вследствие благоприятного сочетания химико-физических и теплофизических свойств и уникальной стойкости в кислородсодержащих средах. В то же время оксиды и оксидные соединения образуют целые классы важнейших технических материалов (флюсы и шлаки, стекла и цементы, огнеупорные и абразивные материалы, оксидные диэлектрики и полупроводники, лазерные и композиционные материалы, люминофоры и материалы для защитных покрытий), от которых зависит уровень развития энергетики, машиностроения, связи и других отраслей народного хозяйства.

При переработке и синтезе оксидных материалов широко используют петрографические процессы, в которых технологическая цель достигается расплавлением вещества. Ограничены возможности методов нагрева, печей, тиглей и измерительных устройств, а также загрязнение расплава материалом тигля, футеровки или нагревателей делают плавку оксидов высшей огнеупорности ($T_{п.} > 1800^{\circ}\text{C}$) трудной задачей. Поэтому любые исследования по разработке новых технических средств плавки и по усовершенствованию существующих являются актуальными.

До недавнего времени плавку оксидных материалов в промышленных масштабах осуществляли только в дуговых печах. Проблему загрязнений решали плавкой в гарнисаже, т. е. с изоляцией расплава закристаллизовавшимся слоем, образующимся при контакте расплава с холодной стенкой тигля. Водоохлаждаемые тигли, получившие название холодных тиглей, являются наиболее существенным конструктивным признаком таких установок, поэтому плавку в гарнисаже часто называют «плавкой в холодной тигле».

В последние годы резко возросли требования к чистоте оксидных материалов, от которой зависят практически все их полезные свойства. Эти требования не могут быть удовлетворены возможностями дуговой плавки даже с использованием гарнисажа, так как происходит загрязнение расплава продуктами эрозии и зольными остатками электродов, а также карбидами восстановленных металлов. В исследованиях по использованию

нагрева в оптических печах, плазменно-дугового, плазменного и электронного нагрева, а также прямого индукционного нагрева существенные результаты получены только при индукционной плавке в холодных тиглях (ИПХТ), представляющей собою совмещение незагрязняющего индукционного метода нагрева и незагрязняющего способа плавки [1, 2].

Интерес к ИПХТ оксидов определяется следующими технико-экономическими показателями процесса:

приемлемой производительностью, составляющей десятки килограммов в час и позволяющей создать ряд промышленных технологических процессов;

приемлемыми удельными затратами электроэнергии, лишь в 3—5 раз превышающими удельные энергозатраты при дуговой плавке. Целесообразность использования ИПХТ особенно высока при переработке особо чистых и дорогих оксидов, когда затраты на электроэнергию составляют доли процента от стоимости сырья;

низкими удельными расходами сырья;

универсальностью технологического оборудования, пригодного для переработки широкой номенклатуры оксидов и легко перестраиваемого для разных технологических процессов;

сокращением объемов работы и капитальных затрат на передельном оборудовании, например, на дробильном при переработке кристаллических оксидов в зерне;

повышением культуры производства.

Следует отметить недостатки и трудности процесса ИПХТ. Это прежде всего:

сложность силового оборудования — высокочастотных ламповых генераторов, что снижает надежность плавильных установок в целом;

сложность технологического оборудования, определяемая особенностями индукционного нагрева, требованиями техники безопасности, санитарными нормами и нормами радиономенспекции;

малые единичные мощности установок, не превышающие в настоящее время 200 кВт, что ограничивает их производительность.

В настоящее время в СССР усилиями ВНИИТВЧ, ЛОЭЗ, ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина) и ИОФАН СССР создана и внедрена в различные отрасли народного хозяйства серия специализированных установок типа «Кристалл-400» для ИПХТ оксидов. Общее число действующих аппаратов этого типа превышает 80 единиц, из них около 40 работает в заводских условиях. Минэлектронпром силами своих организаций создал несколько образцов установок ИПХТ оксидов: «Донец 4», «Вега». Работает серия лабораторных агрегатов в исследовательских

целях. Общая мощность действующих плавильных установок составляет более 10 МВт. Объем производства плавленых оксидов высших кондиций исчисляется сотнями тонн в год. Разрабатываются новые уникальные технологические процессы, которые немыслимо проводить на иной базе кроме ИПХТ, например, варка тугоплавких стекол, отверждение отходов ядерного топливного цикла, производство дисперсных плавленых порошков и другие.

Вышеизложенное свидетельствует, что назрела необходимость обобщения опыта проектирования и эксплуатации высокочастотного технологического оборудования, обеспечивающего ИПХТ оксидов. Этой задаче посвящена настоящая работа.

I. ХАРАКТЕРИСТИКА ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ ОКСИДОВ И УСЛОВИЙ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ

I. ИПХТ ОКСИДОВ КАК ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС. КЛАССИФИКАЦИЯ И СПЕЦИФИКА

Впервые плавку оксидов в индукционной печи провел Ф. Монфорт с целью выращивания монокристаллов ферритов [3]. Однако прообразом ИПХТ тугоплавких оксидов следует считать процесс переплавления поликристаллического оксидного блока, предложенный в начале 1960-х годов А. Чэмэном и Г. Кларком [4]. Схема процесса, получившего название «рост внутренней центробежной зоны» (ICZG), показана на рис. 1, а.

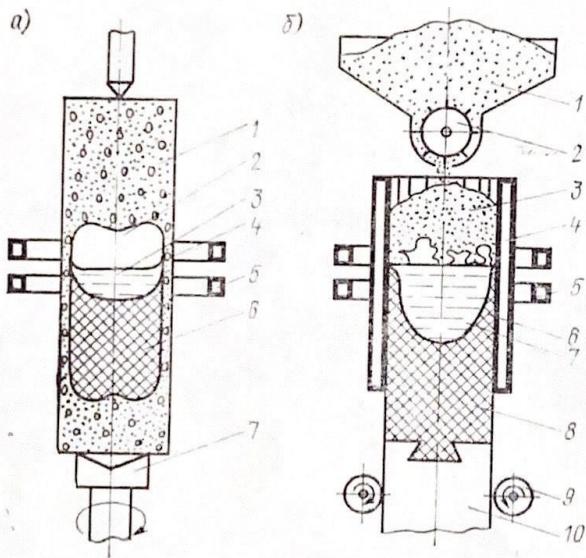


Рис. 1. Индукционная плавка оксидов:
а — схема процесса «роста внутренней центробежной зоны» (ICZG); б — схема индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ)

круг вертикальной оси механизмом 7. Таким путем был получен ряд поликристаллов и эвтектикоподобных композитов, в частности: UO_2 , ZrO_2 , NiTiO_3 , $\text{UO}_2\text{—MgO}$, $\text{UO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$, $\text{UO}_2\text{—W}$, $\text{UO}_2\text{—Ta}$, $\text{ZrO}_2\text{—Ni}$, $(\text{La}_2\text{O}_3 + \text{CeO}_2)\text{—Mo}$, $(\text{UO}_2 + \text{MgO})\text{—W}$. В силу нестабильности теплового баланса

Образец 1 из исходного керамического или металло-керамического материала расплавляют локально с помощью индуктора 5. Зона расплава 3 образуется в оболочке 4 из исходного материала. Зону перемещают вдоль образца 1, что обеспечивает рост поликристалла 6 и приводит к образованию газовой полости 2, как следствие пористости исходного материала. Образец врачают во-

ICZG не получил широкого использования. Однако значение процесса ICZG в том, что он иллюстрирует идею авто-тигеля (от англ. self-crusible), демонстрирует возможность получения гарнисажа без холодного тигеля, только путем правильно подобранных соотношения частоты, мощности индукционного нагрева и условий охлаждения.

Кроме того, процесс ICZG демонстрирует методом «от противного» роль и значение холодного тигеля при ИПХТ оксидов, обозначая функцию тигеля не только как холодильника, формирующего гарнисаж, но и как предохранительного контейнера на случай аварийного проплавления гарнисажа.

Схема ИПХТ с целью переплава порошковой шихты в кристаллический блок показана на рис. 1, б. Внутри водоохлаждаемого металлического тигля 4, состоящего из вертикальных изолированных друг от друга секций, наводят ванну расплава 7. Стенки тигля прозрачны для электромагнитного поля индуктора 5, который концентрически охватывает тигель, поскольку поле проникает внутрь тигля через щели между секциями. Расплав оксида является проводником с определенной проводимостью и поглощает энергию электромагнитного поля, преобразуя ее в теплоту, которая расходуется на компенсацию тепловых потерь и изменение теплового состояния. Расплав перегрет на 50—250°, поэтому поступающая из бункера 1 через дозатор 2 шихта плавится в колошникововой зоне 3, увеличивая объем ванны. Вследствие теплоотвода расплав кристаллизуется, формируя блок 8. С помощью привода 9 и перемещающейся затравки 10 блок выводят из тигля вниз.

В условиях локального нагрева объем ванны расплава ограничен и легко регулируется. Изменяя режимы подачи шихты и снижения блока, можно добиться соответствия скоростей расплавления и кристаллизации и получить квазистационарный процесс. При этом конфигурация ванны будет оставаться неизменной, что является условием получения равномерной структуры по высоте наплавляемого блока. По поверхности контакта расплава с холодной стенкой тигля образуется корочка гарнисажа 6, который препятствует затеканию расплава в зазоры между секциями, предохраняет расплав от постоянного контакта с металлом тигля, а также играет роль футеровки и теплоизоляции ванны, препятствуя ее интенсивному охлаждению.

По классификационным признакам электротермических процессов ИПХТ следует охарактеризовать как прямой высокочастотный нагрев в магнитном поле короткого индуктора короткого же тела (ванны) из материала с переменной электропроводностью.

Возможны три принципиально разных вида ИПХТ, которые различаются по агрегатному состоянию и форме конечного продукта — плавленому материалу.

1. Садочная ИПХТ, целью которой является получение расплава для литья, выращивания монокристаллов, исследований расплава. Для садочной ИПХТ характерны этапы накопления расплава в объеме тигля и выдержки или доведения расплава до кондиции.

2. ИПХТ с непрерывной выработкой расплава. Целью плавки является получение расплава в виде струи или капель. Примером такого процесса является варка стекол с непрерывной выработкой.

3. ИПХТ с непрерывным наплавлением кристаллического блока. Целью плавки является получение слитка из материала, переплавленного или синтезированного в жидкой фазе.

Различие процессов не ограничивается лишь конечным продуктом. Оно имеется в конструкциях печей с холодными тиглями, в числе и последовательности технологических операций, в удельной и общей мощностях, в температуре расплава, в структуре теплового баланса, наконец, в характере тепловых процессов. В частности, садочным ИПХТ на этапе накопления расплава присущи нестационарные тепловые условия, а на этапе выдержки — стационарные. ИПХТ с непрерывной выработкой и непрерывным наплавлением присущи лишь квазистационарные тепловые условия.

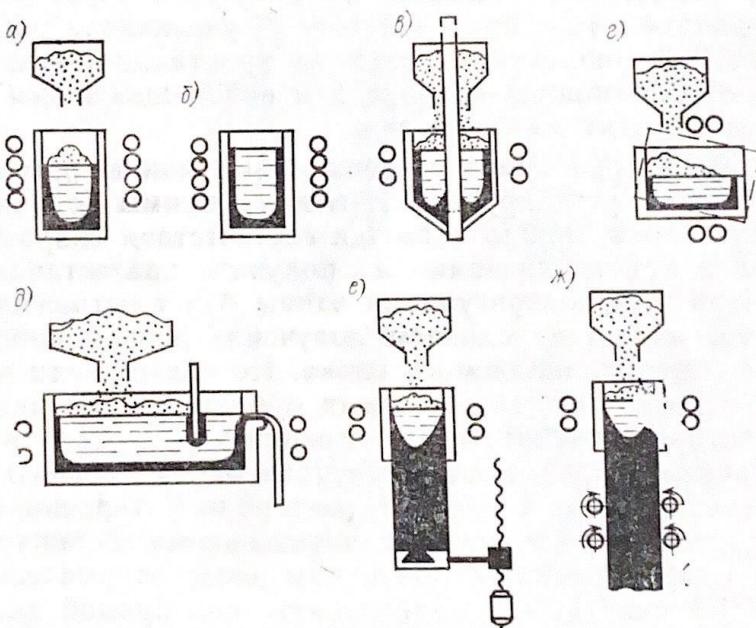


Рис. 2. Схемы садочных нестационарных и наплавных квазистационарных процессов на базе ИПХТ: а — нестационарный садочный процесс в глуходонном тигле; б — стационарный садочный процесс; в — ИПХТ с данным выпуском расплава; г — ИПХТ с выпуском через носок; д — ИПХТ с непрерывной выработкой расплава; е — периодический наплавной процесс; ж — непрерывный наплавной процесс

На рис. 2 показаны схемы ИПХТ, которые иллюстрируют процессы разных видов. Превращение одного вида процесса в другой происходит просто, поэтому легко ошибиться в определении. Достаточно прекратить подачу шихты или остановить перемещение слитка, например в схеме, приведенной на рис. 2, e, как наплавной процесс превращается в нестационарный садочный. Или достаточно стабилизировать мощность индуктора в схеме, приведенной на рис. 2, a, как садочный процесс превращается в наплавной. В то же время идентификация ИПХТ как садочной или наплавной является условием правильного понимания происходящих явлений в ванне и залогом их адекватного физико-математического описания.

Известны три схемы индукционного нагрева расплава в холодных тиглях (рис. 3). Они различаются поверхностью ввода энергии электромагнитного поля в расплав. На рис. 3, a показаны

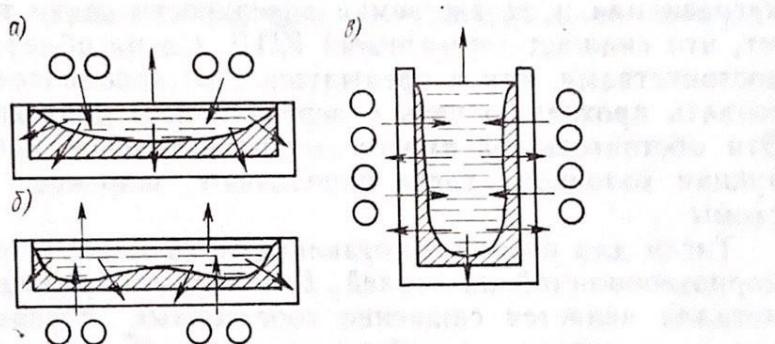


Рис. 3. Схемы поступления и потерь энергии при ИПХТ: а, б — печь с торцевым индуктором; в — печь с цилиндрическим индуктором

зана компоновка печи с вводом энергии через зеркало расплава, для чего используют торцевой индуктор. В этой схеме нагреваемая и охлаждаемая поверхности садки разделены, что обеспечивает высокий термический КПД плавки. Однако торцевой индуктор имеет низкий коэффициент мощности $\cos \phi$. Кроме того, по технологическим особенностям эта схема плавки подобна плавке в дуговой, плазменной или электронно-лучевой печах, где также имеется верхний ввод энергии в садку, с недостатками, присущими такой схеме нагрева. В частности, поверхность расплава значительно перегрета, отсутствует естественная конвекция в ванне и, как следствие, глубина ванны расплава мала. Индуктор, размещенный в зоне термоионизированных газов над расплавом, имеет низкую электрическую прочность зазоров и часто выходит из строя вследствие электрических про-

боев. Поэтому схему, приведенную на рис. 3, а, практически не используют.

На рис. 3, б представлена схема печи ИПХТ с вводом энергии в расплав через дно ванны. Здесь также использован торцевой индуктор, однако сорф его выше, потому что эффективный зазор между индуктором и расплавом меньше. Поскольку нагреваемая и охлаждаемая поверхности ванны совпадают, удельные тепловые потери велики, а термический КПД низкий. Достоинством схемы является интенсивная естественная конвекция в ванне, обусловленная донным нагревом, что позволяет получать глубокие ванны без перегрева зеркала. Электрическая прочность зазоров индуктора велика, так как газ в них не подвержен термоиницииации.

На рис. 3, в представлена схема нагрева с вводом энергии в расплав через боковую поверхность садки. Такая компоновка печи обеспечивает наиболее высокий сорф индуктора. Однако нагреваемая и охлаждаемая поверхности садки также совпадают, что снижает термический КПД. Схема обладает такими же достоинствами, как и предыдущая, но дополнительно позволяет создать проходную печь с вертикальным движением продукта. Эти обстоятельства вместе со сравнительной простотой конструкции холодного тигля определяют широкое использование схемы.

Тигли для плавки изготавливают из меди, алюминия или из коррозионно-стойких сталей. Главным соображением к выбору металла является снижение собственных потерь в тигле, затем — химическая устойчивость металла к продуктам плавки. Чтобы стенки металлического тигля не экранировали садку от индуктора, их выполняют из отдельных секций. При сборке в общую конструкцию секции электрически изолируют друг от друга, оставляя между ними зазоры, параллельные магнитному потоку индуктора. Секционированный тигель отличает печи индукционного нагрева от печей дугового нагрева или электрошлакового переплава, в которых холодные тигли имеют сплошные стенки.

Кроме секционированного металлического тигля ИПХТ оксидов имеет две особенности, отличающие ее от других процессов индукционного нагрева и плавки, а именно: необходимость в предварительном (стартовом) нагреве садки; использование для нагрева высоких частот в диапазоне 0,5—5,0 МГц.

Стартовый нагрев необходим потому, что оксидные материалы в кристаллическом состоянии при нормальной температуре являются хорошими диэлектриками. Они прозрачны для переменного электромагнитного поля и не греются в нем. Чтобы энергия поля выделялась в этих материалах, необходимо использовать очень высокие частоты. Согласно рекомендации [5],

для сквозного нагрева длинного цилиндра диаметром D_2 с удельным сопротивлением ρ_2 минимальная частота в герцах определяется по формуле¹:

$$f \geq 3 \cdot 10^6 \rho_2 / D_2^2. \quad (1)$$

Например, для нагрева материала с $\rho_2 = 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в тигле диаметром $D_2 = 0,1 \text{ м}$ согласно (1) необходимо использовать частоту $3,0 \cdot 10^7 \text{ Гц}$, что соответствует инфракрасной части спектра. Однако в практике индукционного нагрева используемые частоты не превышают 10 Гц , поэтому образец из оксидного материала прозрачен для поля с такой частотой.

Сказанное справедливо, пока температура нагреваемого образца не выше нормальной. Если оксидные материалы предварительно нагревать, то их удельное сопротивление будет уменьшаться (рис. 4). При высоких температурах, близких и выше температуры плавления, ρ_2 может принимать значения $10^{-2} - 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, что, казалось бы, позволяет использовать для на-

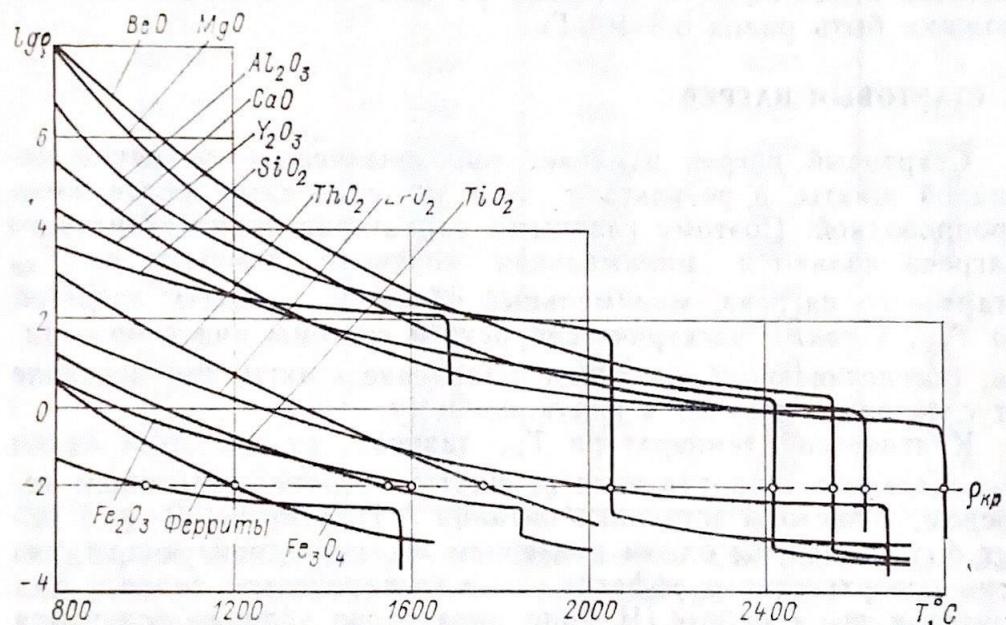


Рис. 4. Температурные зависимости удельного электросопротивления оксидов по данным работ [6, 7] и определение критической температуры стартового нагрева

грева и плавки частоты в диапазоне $10^5 - 10^7 \text{ Гц}$. Например, для плавки в тигле диаметром $D_2 = 0,1 \text{ м}$ оксида алюминия, имеющего при температуре плавления $\rho_2 = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, ми-

¹ Условимся параметры, относящиеся к нагреваемому объекту (шихте или расплаву), обозначать индексом 2, а параметры индуктора индексом 1.

нимальная частота согласно (1) составляет 1,86 МГц. Однако на практике эта частота выше и составляет 4—6 МГц.

Увеличение частоты сравнительно с нижним пределом выражения (1) вызвано тем, что данная рекомендация получена из условия нагрева длинного цилиндра в длинном же индукторе, где краевой эффект несуществен. При ИПХТ оксидов ванна расплава является нагреваемым объектом малой высоты (глубины), а печь всегда имеет короткий индуктор. В этом случае эффективный нагрев получается, когда относительный диаметр ванны $m_2 = D_2 / (\Delta_2 \sqrt{2})$ лежит в диапазоне 5—10. Здесь Δ_2 — глубина проникновения тока в расплав.

Частота, выбранная по формуле (1), должна быть скорректирована после определения оптимального $m_{2\text{opt}}$ согласно формуле (2.7). Тогда частота, Гц:

$$f = 5 \cdot 10^5 \rho_2 m_{2\text{opt}} / D_2^2. \quad (2)$$

В приведенном выше примере плавки оксида алюминия, если печь имеет $m_{2\text{opt}} = 4,7$, рабочая частота по выражению (2) должна быть равна $6,5 \cdot 10^6$ Гц.

2. СТАРТОВЫЙ НАГРЕВ

Стартовый нагрев изменяет теплофизическое состояние оксидной шихты, в результате чего она становится более электропроводной. Поэтому главными характеристиками стартового нагрева являются минимальная конечная температура $T_{\text{кр}}$ стартового нагрева, минимальный объем $V_{\text{ст}}$ шихты, нагретой до $T_{\text{кр}}$, а также электрический режим системы индуктор—садка, обеспечивающий надежное плавление шихты при переходе от стартового нагрева к индукционному.

Критическая температура $T_{\text{кр}}$ зависит от диаметра садки D_2 , удельного сопротивления ρ_2 шихты, нагретой стартовым нагревом, и частоты источника питания f . Параметры D_2, ρ_2, f могут быть заменены одним критерием m_2 , характеризующим степень поверхностного эффекта в цилиндрической садке. Для критерия m_2 в работе [1] было определено условие получения критической температуры стартового нагрева: $m_2 = \sqrt{2}$. Отсюда удельное сопротивление нагретого оксида, Ом·м:

$$\rho_2 = D_2^2 f \cdot 10^{-6}. \quad (3)$$

Зависимости $\rho(T)$ (рис. 4) позволили определить критические температуры для ряда оксидов, значения которых приведены в табл. 1. Там же даны для сравнения температуры плавления соответствующих оксидов согласно работам [6, 7]. Из сопоставления данных табл. 1 следует, что температура стартово-

Таблица 1. Температуры плавления и кипения, а также абсолютная и относительная критическая температуры стартового нагрева оксидов (при $f = 5,28 \text{ МГц}$, $D_2 = 5 \text{ см}$)

Оксид	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{кр}} = T_{\text{кр}}/T_{\text{пл}}$
Al_2O_3	2054	2980	2054	1,0
BaO	1917	2200	1917	1,0
BeO	2570	4260	2570	1,0
MgO	2800	3000	2800	1,0
CaO	2630	3527	2630	1,0
Sc_2O_3	2405	—	2405	1,0
TiO_2	1850	2927	900	0,49
V_2O_3	1970	3027	900	0,46
Cr_2O_3	2334	3000	1700	0,73
MnO	1785	3127	1300	0,73
Fe_3O_4	1583	2623	1000	0,55
CoO	1810	2627	600	0,33
Y_2O_3	2410	4300	1600	0,66
ZrO_2	2677	4300	1600	0,60
NbO_2	2080	3527	2080	1,0
In_2O_3	2000	3327	2000	1,0
La_2O_3	2250	4200	1300	0,58
Pr_2O_3	2127	3727	2127	1,0
Sm_2O_3	2320	3527	2320	1,0
Er_2O_3	2380	3000	2380	1,0
ThO_2	3250	4400	1750	0,54
HfO_2	2850	—	2850	1,0
Ga_2O_3	1740	2627	1740	1,0
SrO	2415	3000	2415	1,0
Ta_2O_5	1890	2227	1200	0,63
UO_2	2800	—	500	0,18

го нагрева большинства оксидов близка или равна $T_{\text{пл}}$. Для оксидных сплавов критическая температура лежит в температурном интервале плавления обычно ближе к ликвидусу. В практике ИПХТ оксидов это обстоятельство очень упрощает контроль за результатами стартового нагрева садки. Нагрев считают успешным, если появилась жидккая фаза.

Если нагретую стартовую зону представить в виде шайбы с диаметром $D_{\text{ст}}$, высотой $a_{\text{ст}}$ и объемом $V_{\text{ст}}$, то при нагреве в тиглях с внутренним диаметром $D_2 \leq 0,2 \text{ м}$ рекомендуемые соотношения размеров зоны будут: $D_{\text{ст}} = 0,7 \div 1,0 D_2$; $a_{\text{ст}} = 0,05 \div 0,1 D_2$; $V_{\text{ст}} = 0,04 \div 0,08 D_2^3$. В тиглях с $D_2 > 0,2 \text{ м}$ объем $V_{\text{ст}}$ может быть меньше рекомендуемого, если стартово-

вую зону формировать в виде тора. Однако диаметр и высота тора должны соответствовать рекомендованным соотношениям.

Для реализации стартового нагрева могут быть использованы следующие способы: нагрев теплопроводностью от металлического или графитового тела, нагреваемого индукционно или по методу сопротивления; прямой нагрев закрытой электрической дугой; индукционный нагрев электропроводной составляющей многокомпонентной шихты с последующим добавлением в расплав неэлектропроводных компонент; нагрев теплом экзотермической реакции окисления сжиганием металла, окисел которого подлежит плавлению.

Из перечисленных способов наиболее широко используют нагрев электрической дугой и теплотой сжигаемого металла.

Использование дугового нагрева целесообразно в установках с тиглями большого диаметра, допускающими свободный ввод электродов дуги внутрь тигля. Мощность дуги должна быть достаточной для получения стартового объема расплава, т. е. составлять 0,3—0,5 мощности индукционного нагревателя. Используют закрытую термическую дугу, зависимую от расплава. Употребляют только графитированные электроды, которые имеют меньшую зольность и высокую температуру окисления.

Стартовый нагрев сжиганием металла заключается в индукционном нагреве небольшого количества порошка, крупки или стружки металла, заложенного в тигель вместе с шихтой. Металл нагревают до температуры возгорания на воздухе, после чего он сгорает самостоятельно с выделением значительного количества тепла. Сжигание металла может протекать под слоем шихты, что важно для сокращения тепловых потерь, поэтому можно нагреть и расплавить значительный объем шихты. При плавке простых оксидов (Al_2O_3 , Y_2O_3 , ZrO_2 и др.) старт сжиганием соответствующего металла не вызывает сомнений в стехиометрическом составе получающегося оксида. Отклонения от стехиометрии могут возникать лишь при дефиците кислорода, неполном окислении металла и образовании металло-окисного сплава. Если плавке подвергают двойные или тройные системы, то можно сжигать металл любого из оксидов системы, который дешевле или доступней.

Количество металла g , необходимого для проведения реакции окисления с термическим эффектом, достаточным для получения расплава в объеме, равном $V_{\text{ст}}$, можно определить по формуле

$$g = ZV_{\text{ст}}. \quad (4)$$

Здесь Z — характеристика стартового нагрева, называемая «удельным запалом», с размерностью $\text{кг}/\text{м}^3$. Она представляет собой массу сжигаемого металла, необходимую для нагрева и

расплавления 1,0 м³ оксида этого металла. Ниже приведены значения удельного запала, взятые из работы [2], для ряда металлов, образующих тугоплавкие оксиды (металлы расположены по мере возрастания их номера в периодической системе элементов).

Металл Z, кг/м ³	Be	Al	Sc	Tl	Cr	Y	Zr
	420	480	515	580	1220	985	1150
Металл Z, кг/м ³	Nb	La	Ce	Sm	Hf	Th	U
	1170	1210	1460	1490	2270	2570	3375

Например, для стартового нагрева Al₂O₃ в объеме $V_{ст} \approx 30$ см³ (зона нагрева с $D_{ст} = 6$ см и $a_{ст} = 1$ см) необходимо сжечь $g = 480 \cdot 30 \cdot 10^{-6} = 0,0144$ кг металлического алюминия, желательно в виде порошка или стружки.

Отметим, что оксиды металлов щелочно-земельной группы (Mg, Ca, Sr, Ba, кроме Be) не могут быть расплавлены сжиганием своих металлов, так как температуры горения паров указанных металлов ниже температур плавления их оксидов. Для старта ИПХТ этих оксидов нужно использовать либо дуговой нагрев, либо ИПХТ другого оксида, например Al₂O₃, с последующим разбавлением расплава желаемым компонентом.

3. ПРОБЛЕМА МОДЕЛИ ИПХТ

Первые успешные эксперименты по синтезу химических соединений и выращиванию монокристаллов обозначили перспективность и практическую значимость ИПХТ оксидов как технологического метода. Поэтому одновременно с решением практических задач технологии новых материалов встал вопрос о теоретическом обеспечении как метода в целом, так и конкретных его приложений. С позиций электротермии это означало создание теоретической модели плавки, которая адекватно описывала бы энергетические соотношения, условия стабильного индукционного нагрева, условия регулирования температуры, а также позволяла бы прогнозировать технологический и технико-экономический результат: качество продукта, производительность, затраты.

Однако, несмотря на более чем 25-летний период существования ИПХТ оксидов, начиная с работ [3, 4, 8], теоретическое обобщение ее не имеет законченного вида, а для ряда новых технологических применений существует лишь на уровне экспертных оценок. Такое положение объясняется тем, что не представляется возможным совместно описать или создать общую модель многообразия явлений, происходящих в ванне рас-

Таблица 2. Физические и физико-химические процессы и явления при ИПХТ оксидов

Где происходит	Процесс или явление
В шихте над расплавом	Термодиссоциация химических соединений Испарение влаги Барботаж шихты газами и паром Спекание шихты Термоионизация газов у зеркала Конденсация паров на шихте
В расплаве на зеркале ванны	Плавление шихты с расходом скрытой теплоты плавления Растворение и выделение газов Испарение основного вещества и примесей Излучение теплоты
В расплаве в объеме ванны	Выделение теплоты индукционного нагрева Тепловая и электродинамическая конвекция Изменение свойств с температурой Диссоциация комплексов ионов при нагреве и обратное комплексование их при охлаждении Теплопередача через гарнисаж
На фронте кристаллизации в переходном жидкотвердом слое	Кристаллизация с выделением скрытой теплоты Выделение растворенных газов и образование пор Разделение примесей и накопление их перед фронтом Ступенчатое изменение свойств вещества
В слитке ниже фронта кристаллизации	Процессы теплообмена со средой Пластические деформации Развитие термоупругих напряжений и разрушение Аллотропические превращения Изменение свойств с температурой и фазовыми превращениями

плава, над и под нею. В табл. 2 названы некоторые из этих процессов и явлений.

Трудности создания обобщающей теории определяются разнообразием технологических процессов, которые нужно разрабатывать для огромной номенклатуры оксидных материалов с широким диапазоном свойств, не всегда известных. Исследования приходится проводить при высоких температурах и при высоких напряженностях электромагнитного поля, когда число измерительных методик и приборов ограничено. Общей и наиболее серьезной трудностью является нелинейность свойств оксидов и нелинейность условий их нагрева и плавки. Назовем такие нелинейные зависимости как: объем и форма ванны расплава от мощности, выделяющейся в ней; распределение

ление источников теплоты по ванне в функции геометрических параметров индукционной системы, а также в функции электрических свойств жидкости; электрические, тепловые и оптические свойства жидкости от температуры; электродинамическое перемешивание от температуры и напряженности поля; выходная мощность лампового генератора от параметров нагрузки.

Таким образом, создание общей математической модели остается главной задачей теоретического описания ИПХТ оксидов и ждет своего исследователя. В настоящей работе мы коснемся лишь электротермических аспектов процесса, а именно теплового и электрического режимов плавки.

4. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС И ТЕРМИЧЕСКИЙ КПД

В садочной ИПХТ на этапе накопления расплава и формирования ванны тепловые процессы нестационарны. Поскольку энергия нагрева выделяется только в жидкой фазе, рассмотрим тепловой баланс области, очерченной границей раздела жидкость — твердое (рис. 5, а). Баланс мощностей имеет вид:

$$P_2 = \Sigma P_{\text{н}} + P_{\text{ш}}, \quad (5)$$

где P_2 — мощность, выделяющаяся в увеличивающемся объеме расплава V ; $\Sigma P_{\text{н}}$ — сумма мощностей тепловых потерь ванны: через дно, $P_{\text{д}}$; через боковую поверхность, P_6 ; с поверхности зеркала расплава, P_3 ; $P_{\text{ш}}$ — мощность, передаваемая от расплава к шихте.

Отметим обстоятельство, важное для дальнейшего сравнения этого случая с другими ИПХТ: в каждый момент мощность $P_{\text{ш}}$ реализуется на образование расплава в объеме ΔV , который находится вне очередного объема V . В следующий момент баланс (5) должен быть рассмотрен для другой ванны с $V + \Delta V$ и т. д.

Термический КПД этого процесса

$$\eta_{\text{т}} = \frac{\int_0^{\tau_{\text{н}}} P_{\text{ш}}(\tau) d\tau}{\int_0^{\tau_{\text{н}}} [P_{\text{ш}}(\tau) + P_3(\tau) + P_{\text{д}}(\tau) + P_6(\tau)] d\tau} = \frac{P_{\text{ш,ср}}}{P_{2\text{ср}}}, \quad (6)$$

где $\tau_{\text{н}}$ — время наплавления расплава в полном объеме $V_{\text{т}}$ тигля; $P_{2\text{ср}}$ — мощность печи, усредненная за время $\tau_{\text{н}}$.

В том же процессе на этапе выдержки расплава задачей является поддержание объема $V_{\text{т}}$ при температуре T_p (рис. 5, б). Процесс стационарный. Баланс ванны:

$$P_2 = \Sigma P_{\text{н}}. \quad (7)$$

Термический КПД этой стадии плавки равен нулю.

В ИПХТ с непрерывной выработкой расплава задачей является получение струи или капель жидкости с массовой скоростью M_b (рис. 5, в). Процесс квазистационарный. Расходную

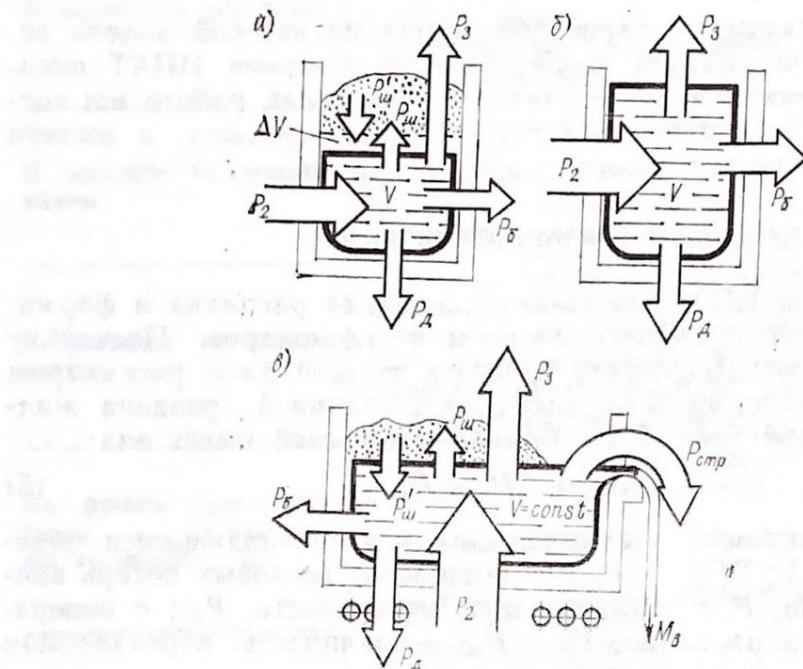


Рис. 5. Схемы баланса мощностей при ИПХТ: а — садочная нестационарная плавка; б — садочная стационарная; в — с выработкой расплава струей

часть баланса составляет сумма $\Sigma P_n + P_{ш} + P_{стр}$, где $P_{стр}$ — тепловая мощность, уносимая струей жидкости с расходом M_b . Приходная часть баланса может быть представлена как $P_2 + P'_ш$, где $P'_ш$ — мощность, вносимая в ванну постоянного объема V расплавом, образующимся также со скоростью M_b . В общем случае $P_{ш} > P'_ш$, так как в шихте возможны процессы диссоциации, испарения влаги, десорбции газов и др. Однако, если мощность на эти процессы рассматривать как одну из составляющих ΣP_n , то можно считать $P_{ш} = P'_ш$, и тогда тепловой баланс ИПХТ имеет вид

$$P_2 = \Sigma P_n + P_{стр}, \quad (8)$$

а термический КПД

$$\eta_t = P_{стр}/P_2. \quad (9)$$

В ИПХТ с непрерывным наплавлением блока целью является получение кристаллического слитка. Процесс квазистационарный. Ванна постоянного объема. Поскольку затвердевание осуществляется по нижней границе ванны, то в пределах переходного жидкотвердого слоя (рис. 6, а) выделяется скрытая теплота кристаллизации с мощностью $P_{\text{кр}} = M_{\text{в}} \Delta H_{\text{пл}}$. Здесь $M_{\text{в}}$ — массовая скорость наплавления; $\Delta H_{\text{пл}}$ — удельная теплота плавления. Мощность $P_{\text{кр}}$ повышает температуру переходного слоя, поэтому выделяющаяся теплота частично, долей $n P_{\text{кр}}$, уходит с общим потоком теплоты, отводимой от ванны в слиток, а частично, долей $(1-n) P_{\text{кр}}$, остается в расплаве, повышая его теплосодержание. Эти доли $P_{\text{кр}}$ не равны. Коэффициент n всегда больше 0,5.

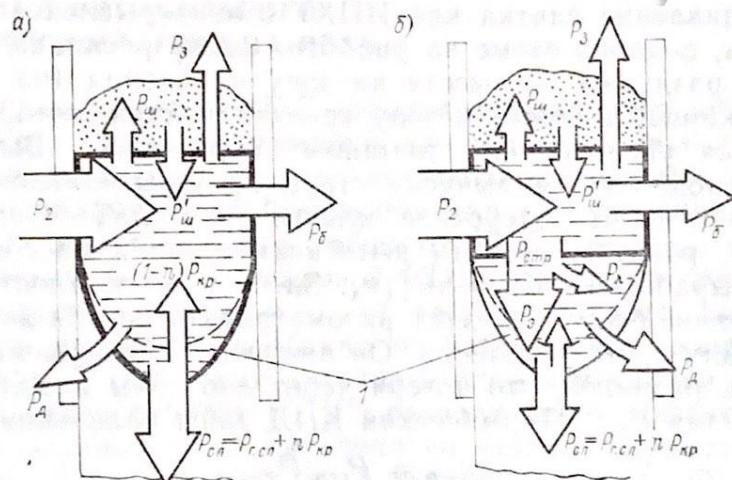


Рис. 6. Схема баланса мощностей ИПХТ с непрерывным наплавлением блока: а — при рассмотрении печи подобно индукционному нагревателю; б — при рассмотрении наплавления блока подобно выработке расплава струей:
I — жидкотвердый слой

Расходная часть баланса, как и в предыдущем случае, состоит из $\Sigma P_{\text{п}} + P_{\text{ш}} + P_{\text{сл}}$. Последнее слагаемое аналогично $P_{\text{стру}}$ в формуле (8), но несет в себе не всю мощность «струи», а лишь сумму мощности горячего слитка $M_{\text{в}} (H_{T_{\text{пл}}} - H_{298})$ и долю мощности превращения $n P_{\text{кр}} = n \Delta H_{\text{пл}} M_{\text{в}}$. Здесь $H_{T_{\text{пл}}}$ и H_{298} — энталпия оксида при $T_{\text{пл}}$ и 298 К.

Вследствие того, что $P_{\text{кр}}$ выделяется внутри рассматриваемой ванны и является следствием ранее затраченной P_2 , остающуюся в расплаве долю $(1-n) P_{\text{кр}}$ нельзя записать в приходную часть баланса. Поэтому сумма мощностей, поступающих в ванну, как и в предыдущем случае, состоит из $P_2 + P_{\text{ш}}$. Если

соблюдено равенство $P_{ш} = P'_{ш}$, то уравнение баланса имеет вид

$$P_2 = \Sigma P_{ш} + P_{сл}, \quad (10)$$

а термический КПД

$$\eta_t = P_{сл}/P_2. \quad (11)$$

Уравнения (10), (11) аналогичны уравнениям для индукционного нагревателя металлов [5], в который входит холодный твердый металл и выходит твердый, но горячий. Это дает основание печь ИПХТ для наплавления слитков рассматривать как индукционный нагреватель шихты с попутным увеличением ее компактности.

Можно получить тот же результат, рассматривая непрерывное наплавление слитка как ИПХТ с непрерывной выработкой расплава, подобно схеме на рис. 5, в. Ванну расплава (рис. 6, б) условно разделим по высоте на зону плавления (на схеме обведена жирной линией) и зону кристаллизации, которая характеризуется увеличением толщины гарнисажа. Вытягивание слитка уподобляется выпуску струи из зоны плавления. При этом струя имеет поперечное сечение тигля πR_2^2 , скорость «истечения», равную скорости вытягивания v_b , и массовую скорость «выработки» $M_b = \pi R_2^2 \gamma v_b$. Здесь γ — плотность расплава. Тепловой баланс следует рассматривать не для всей ванны, а лишь для зоны плавления. Он аналогичен выражению (8) с той лишь разницей, что потери через дно зоны плавления входят в состав $P_{стр}$. Термический КПД зоны плавления

$$\eta_{з.п} = P_{стр}/P_2. \quad (12)$$

Однако полезной мощностью по-прежнему остается лишь та, которую уносит слиток: $P_{сл} = M_b (H_{T_{пл}} - H_{298}) + n P_{кр}$. Поэтому следует также рассмотреть тепловой баланс струи:

$$P_{стр} = P_{з} + P_{λ} = P_{д} + P_{сл}. \quad (13)$$

Здесь в приходной части: $P_{з}$ — мощность, определяемая мас-сопереносом движущегося расплава; $P_{λ}$ — мощность, передаваемая теплопроводностью от зоны плавления к зоне кристаллизации.

Термический КПД струи

$$\eta_{стр} = P_{сл}/(P_{д} + P_{сл}) = P_{сл}/P_{стр}. \quad (14)$$

Общий КПД системы тождественен (11)

$$\eta_t = \eta_{з.п} \cdot \eta_{стр} = P_{сл}/P_2. \quad (15)$$

Рассмотрение слитка как струи расплава позволяет разделить электротепловые процессы индукционного нагрева в пла-

вящей части ванны и чисто тепловые процессы в кристаллизуемой части. Проясняется физический смысл мощности потерь P_d через дно ванны. Их можно рассматривать как разность тепловых мощностей, которые переносит струя на входе и на выходе из кристаллизуемой части ванны. Фактически это мощность тепловых потерь от слитка к стенкам холодного тигля ниже зоны плавления. После расшифровки слагаемых (13) имеем:

$$P_d = P_\lambda + M_b [H_{T_p} - n\Delta H_{pl} - (H_{T_{pl}} - H_{298})], \quad (16)$$

где H_{T_p} — энталпия расплава при T_p .

Определение составляющих теплового баланса выполняется по известным методикам [4, 7] и за отсутствием места в данной работе не приводится.

5. КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИПХТ

В рабочем режиме ИПХТ оксидов представляет собой сквозной нагрев, т. е. он выполняется при значениях $m_2=3\div7$. Традиционный подход к анализу индукционных систем сквозного нагрева металлов [5, 9] базируется на исследовании условий получения максимального общего КПД, $\eta=\eta_1\eta_t$, где η_1 — электрический, а η_t — тепловой КПД устройства. Это определяется зависимостью η_1 и η_t от частоты нагрева, свойств нагреваемого металла и особенно от воздушного зазора индуктор—деталь. В отличие от нагрева и плавки металлов подобный подход к исследованию ИПХТ оксидов мало эффективен, потому что значение η не критично ко многим параметрам печи и режима. Действительно, η_t в выражениях (6), (9), (11) не зависит от частоты нагрева или зазора индуктор—ванна, так как почти полностью определяется перегревом расплава и условиями теплообмена его с холодным тиглем. В свою очередь электрический КПД согласно данным работы [9] имеет вид

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{L_{\text{экв}} a_2}{\pi D_2 a_1 c m_2 A} \sqrt{\frac{2\rho_1}{\rho_2}}}, \quad (17)$$

где a_1, a_2 — высоты индуктора и ванны; c — коэффициент приведения сопротивления нагрузки к индуктору, равный отношению токов I_2^2/I_1^2 ; A — расчетный коэффициент активного сопротивления цилиндра; $A=f(m_2)$ (рис. 7); $Z_{\text{экв}}$ — эквивалентная длина пути тока в индукторе и тигле, определяемая суммой $\pi(D_1 + D_2 + D_t)$.

Если частота выбрана в соответствии с рекомендациями (1), (2), то при практически реализуемых геометрических соотно-

шениях ванны и индуктора, η_1 получается постоянным и равным 0,95—0,90. Это является следствием огромной разницы удельных электросопротивлений Q_1 и Q_2 , отношение которых равно 10^{-5} — 10^{-6} .

Высокий η_1 является важной положительной особенностью ИПХТ оксидов, определяющей высокие технико-экономические показатели процесса в целом. В то же время постоянное значение η_1 не может служить критерием при анализе условий ИПХТ. Соответственно, произведение $\eta_1 \eta_t$ также не является критичным в условиях плавки или конструкции печи.

Критичным параметром ИПХТ оксидов является коэффициент мощности индуктора $\cos \varphi_1$.

Прежде всего, значение $\cos \varphi_1$ определяет напряжение на индукторе. Необходимая для плавки мощность P_2 реализуется при напряжении

$$U_1 = \sqrt{\frac{P_2 z_{1\text{экв}}}{\eta_1 \cos \varphi_1}}, \quad (18)$$

Рис. 7. Расчетные коэффициенты активного (A) и реактивного (B) сопротивлений цилиндра, нагреваемого в цилиндрическом индукторе [5]

где $z_{1\text{экв}}$ — полное эквивалентное сопротивление индуктора, Ом. Чем меньше $\cos \varphi_1$, тем больше должно быть U_1 . Поскольку при ИПХТ оксидов используют частоты от 1,0 МГц и выше, то U_1 всегда составляет сотни и тысячи вольт. Однако значение U_1 ограничено электрической прочностью воздушных зазоров в печи и не может превышать некоторой предельной величины $U_{1\text{max}}$, которая зависит от газовой среды плавки и температуры на поверхности гарнисажа. В целях исключения электрических пробоев U_1 должно быть по возможности меньше. Согласно формуле (18) это достигается только с увеличением $\cos \varphi_1$. Следовательно, печи для ИПХТ оксидов необходимо проектировать таким образом, чтобы они имели возможно больший $\cos \varphi_1$.

Из формулы (18) следует также, что при стабилизации напряжения U_1 , мощность P_2 изменяется в соответствии с изменением $\cos \varphi_1$. Зависимость $P_2(\cos \varphi_1)$ — прямая при больших воздушных зазорах, когда $z_{1\text{экв}}$ определяется в основном магнитным потоком в зазоре. В этом случае анализ условий ИПХТ можно ограничить рассмотрением зависимостей $\cos \varphi_1$ от интересующих нас параметров печи и режима плавки, таких как a_2/a_1 ; D_2/D_1 ; m_2 и др.

Выбор $\cos \varphi_1$ в качестве исследуемой функции определяется также характерной зависимостью его от относительного диаметра $m_2 = D_2 / (\Delta_2 \sqrt{2})$, которая имеет максимум. Общее выражение $\cos \varphi_1(m_2)$ длинного индуктора при нагреве длинного цилиндра согласно данным работы [9] имеет вид:

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1 + r'_2}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + (x_{\text{в}} + x_{1\text{м}} + x'_2)^2}}. \quad (19)$$

Здесь r_1 и $x_{1\text{м}}$ — активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктирующего провода с учетом вносимых сопротивлений металла холодного тигля. При высоких частотах индуктор с числом витков w имеет

$$r_1 = x_{1\text{м}} = w^2 \pi L_{\text{экв}} \rho_1 / (a \Delta_1). \quad (20)$$

Активное сопротивление r'_2 нагреваемого цилиндра, приведенное к индуктору, выражается как

$$r'_2 = w^2 \pi D_2 \rho_2 m_2 A / (a \Delta_2 \sqrt{2}). \quad (21)$$

Внутреннее реактивное сопротивление x'_2 цилиндра, приведенное к индуктору, выражается как

$$x'_2 = w^2 \pi D_2 \rho_2 m_2 B / (a \Delta_2 \sqrt{2}), \quad (22)$$

где B — расчетный коэффициент реактивного сопротивления цилиндра, $B = f(m_2)$ (рис. 7). Реактивное сопротивление $x_{\text{в}}$, обусловленное магнитным потоком в воздушном зазоре, вычисляется по формуле

$$x_{\text{в}} = \mu_0 2 \pi^2 f(D_1^2 - D_2^2) w^2 / (4a), \quad (23)$$

где μ_0 — магнитная постоянная.

Подставив формулы (20) — (23) в (19), получим $\cos \varphi_1 = \Psi(m_2, f, D_1, D_2)$. При частотах ИПХТ оксидов можно пренебречь значениями $r_1 = x_{1\text{м}}$, имеющими порядок 10^{-2} . Тогда выражение (19) сводится к виду

$$\cos \varphi_1 = 1 / \sqrt{1 + \left[\left(\frac{D_1^2}{D_2^2} - 1 \right) \frac{1}{A} + \frac{B}{A} \right]^2}, \quad (24)$$

которое характеризует $\cos \varphi_1$ при постоянном значении m_2 . В формулу (24) входят лишь безразмерные величины, а отношение D_1^2/D_2^2 есть величина, обратная коэффициенту заполнения окна индуктора

$$K_3 = D_2^2 / D_1^2. \quad (25)$$

Если $D_1 = D_2$, то (24) аналогично выражению $\cos \varphi_1$ при поглощении цилиндрической электромагнитной волны в сплошном металлическом цилиндре [10]:

$$\cos \varphi_1 = 1/\sqrt{1 + (B/A)^2}. \quad (26)$$

Эта зависимость не имеет экстремума и при $m_2 > 10$ приобретает постоянное значение 0,707.

Если $D_2 < D_1$, то, учитывая характерную зависимость $A(m_2)$ (рис. 7), выражение (24) есть также функция m_2 с максимумом. На рис. 8 показаны зависимости $\cos \varphi_1(m_2)$ при разных D_1/D_2 , рассчитанное по (24).

Наиболее острый максимум имеют кривые при $D_1/D_2 = 1,1 \div 1,5$, или при $K_3 = 0,85 \div 0,4$. Максимум функции $\cos \varphi_1(m_2)$ служит указанием того, что существуют оптимальные условия нагрева цилиндра: одну и ту же активную мощность P_2 можно получить при минимальной полной мощности. Обозначим m_2 , при котором $\cos \varphi_1$ максимальен, через $m_{2\text{opt}}$. При $m_2 \ll m_{2\text{opt}}$ можно считать цилиндр практически прозрачным для электромагнитного поля. Мощность P_2 , выделяющаяся в нем, мала. При $m_2 \gg m_{2\text{opt}}$ ярко выражен поверхственный эффект, но r_2 и

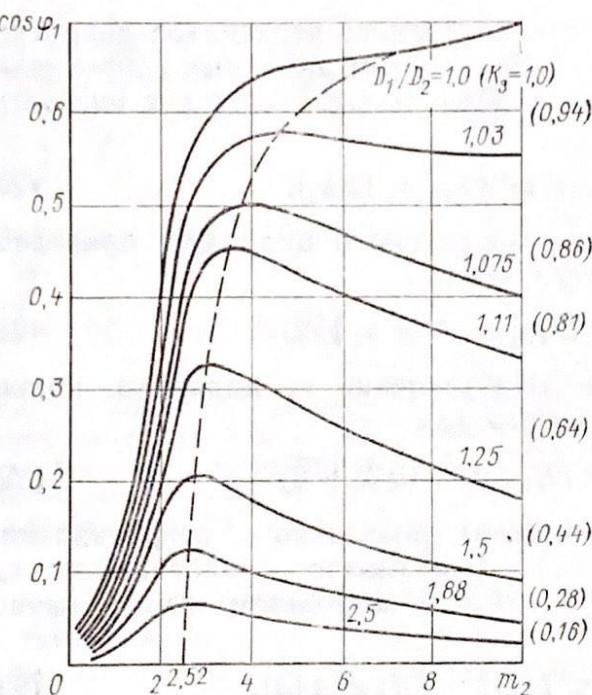


Рис. 8. Зависимости $\cos \varphi_1$ от относительного диаметра $m_2(\sigma_2)$ и соотношения D_1/D_2 при постоянной частоте

$\cos \varphi_1$ уменьшаются вместе с коэффициентом $A(m_2)$, и полезная мощность также получается малой. Нагрев цилиндра наиболее эффективен в диапазоне $m_2 = 2 \div 7$, что, как было сказано выше, соответствует условиям сквозного индукционного нагрева цилиндрических деталей [5].

Зависимости на рис. 8 построены для длинного индуктора и длинного цилиндра и не учитывают краевые эффекты. Реальные печи ИПХТ имеют отношения a_1/D_1 и a_2/D_2 в диапазоне 0,1—1,0, т. е. являются короткими индукционными системами. В таких печах максимум функции $\cos \varphi_1(m_2)$ проявляется более резко. На рис. 9 изображены электрические характеристики реальной печи в зависимости от m_2 при постоянных D_1, D_2, a_1 ,

a_2 , f и P_2 . Графики демонстрируют в сравнении изменение параметров печи и показывают, что наиболее критичными из них являются r'_2 и $\cos \varphi_1$, которые практически повторяют друг друга.

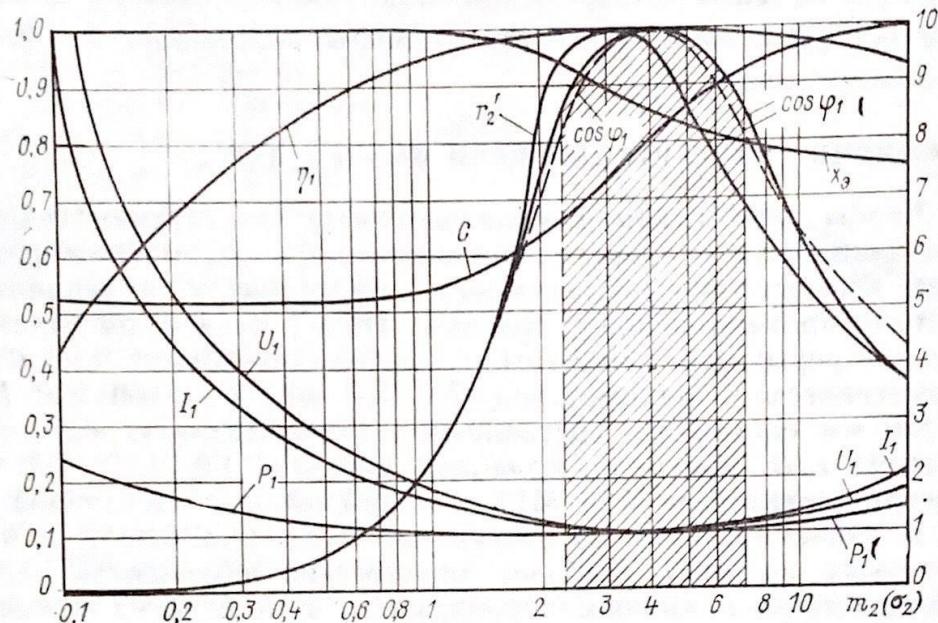


Рис. 9. Сравнение изменения электрических параметров печи ИПХТ от относительного диаметра m_2 ванны расплава. Параметры нормированы относительно экстремального значения и определены при постоянных P_2 , f , D_2/D_1 и a_2/a_1

При постоянных f и D_2 увеличение m_2 соответствует увеличению электропроводности σ_2 расплава. При плавке оксидов увеличение σ_2 возможно с увеличением T_p или при изменении химического состава расплава. Поэтому зависимости на рис. 9 отражают изменение условий выделения постоянной мощности P_2 с изменением состояния жидкости, например, от стартового нагрева до конечного перегрева ванны, или при легировании расплава. Для ИПХТ оксидов, реализуемой только при повышенном напряжении на индукторе, возможность получить требуемую P_2 при минимальном напряжении является важным условием надежности печи и характеризует оптимум условий плавки. Назовем режимы плавки и состояния расплава с $m_2 < m_{2\text{opt}}$ дооптимальными, а с $m_2 > m_{2\text{opt}}$ заоптимальными.

Таким образом, изменение $\cos \varphi_1(m_2)$ отражает влияние на активную мощность нагрева как размеров индукционной системы, так и параметров состояния расплава: температуры и химического состава. Это дает основание рассматривать значение $m_{2\text{opt}}$, при котором $\cos \varphi_1$ максимальен, как основной критерий

при исследованиях ИПХТ оксидов и выработке рекомендаций по проектированию печей [11]. При выбранных размерах индуктора, тигля и ванны расплава, зная $m_{2\text{opt}}$, мы получаем возможность рекомендовать тепловой режим плавки, в частности T_p и P_2 . Или наоборот, при заданном значении T_p и известном $Q_2(T_p)$ можно рассчитать размеры индукционной системы, обеспечивающие $m_{2\text{opt}}$.

6. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЕЧИ НА $\cos \varphi_1$ И $m_{2\text{opt}}$

Чтобы понять, как влияют элементы конструкции печи на получение максимального значения $\cos \varphi_1$, рассмотрим результаты конкретного исследования. Исследовали индукционную систему промышленной установки ИПХТ типа «Кристалл-402» для непрерывного наплавления кристаллического блока. Ее геометрические параметры: $D_1 = 150$ мм; $D_2 = 100$ мм, $D_t = 120$ мм оставались постоянными. Относительную высоту индуктора a_1/D_2 изменяли, придавая значения 1,0; 0,75; 0,5; 0,25. Частота генератора 5,28 МГц поддерживалась постоянной.

В зависимости от состояния расплава (температуры и химического состава) наиболее значительно изменяются две характеристики, а именно: проводимость σ_2 и глубина ванны a_2 . Диапазон изменения a_2/a_1 0,25—2,0; диапазон изменения проводимости $10-10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

На рис. 9 представлены интегральные электрические характеристики печи ИПХТ в зависимости от $m_2(\sigma_2)$ при $P_2=\text{const}$ и $f=\text{const}$. Кривые рассчитаны по методу полного магнитного потока и изображают кроме упомянутых ранее характеристик: η_1 , $\cos \varphi_1$, r'_2 , U_1 , I_1 , P_1 также коэффициент C приведения параметров ванны к параметрам индуктора; x_s — эквивалентное реактивное сопротивление индуктора. Все величины взяты в относительных единицах к максимальному или минимальному значению параметра в исследуемом диапазоне m_2 . Выбранный диапазон m_2 соответствует условиям плавки от садки практически прозрачной для электромагнитного поля ($m_2 \approx 0,1$) до ярко выраженного поверхностного эффекта в расплаве ($m_2 > 5$).

Из рис. 9 следует, что при ИПХТ рабочим диапазоном m_2 является диапазон 2, 3—7 (заштрихованный на графике). Если $m_2 < 3$, сопротивление r'_2 и $\cos \varphi_1$ уменьшаются более резко, чем у длинного цилиндра (см. рис. 8) из-за влияния $A(m_2)$, а также вследствие снижения коэффициента приведения C . Уменьшение r'_2 приводит к уменьшению $\cos \varphi_1$ и η_1 и, при поддержании требуемой мощности P_2 , к увеличению тока и напряжения на индукторе. Это нежелательно, так как возрастает напряженность электрического поля в зазорах печи и увеличивается вероятность возникновения пробоя.

Если $m_2 > 4$, то r'_2 и x_2 также уменьшаются, что приводит к снижению $\cos \varphi_1$ несмотря на относительное увеличение коэффициента C . В то же время η_1 остается почти постоянным. Ток и напряжение увеличиваются незначительно. Поэтому увеличение m_2 не является критичным для процесса, и можно увеличить температуру расплава или увеличить диаметр тигля против оптимального, если мощность генератора позволяет это сделать.

Условия получения максимального $\cos \varphi_1$ в зависимости от a_2/a_1 и a_1/D_2 представлены графиками на рис. 10. С целью выявить влияние металлического тигля и его дна на зависимость $\cos \varphi_1(m_2)$ первоначально расчеты проделаны без учета влияния тигля. В практической работе такая модель соответствует индукционной печи с кварцевым водоохлаждаемым тиглем, который не оказывает влияния на электрические характеристики. При этом коэффициент заполнения окна индуктора (25) в выбранной печи $K_3 = 0,44$.

На рис. 10 видим, что при уменьшении a_2 максимум $\cos \varphi_1$ уменьшается по абсолютному значению и сдвигается в сторону больших m_2 . Явление можно объяснить, если рассматривать снижение m_2 как снижение σ_2 . Осевая прозрачность ванны, которая появляется при соотношении $a_2/\Delta_2 \leq 3$ и при которой $\cos \varphi_1$ стремительно падает, у мелких ванн проявляется при больших σ_2 , чем у глубоких. Или иначе: чтобы ванну меньшей глубины нагревать при максимальном $\cos \varphi_1$, необходимо расплав в ней поддерживать при большей температуре, чем в ванне большей глубины. Для нормальной работы печи мелкие ванны требуется больше перегревать против T_{pl} .

Значение m_{2opt} , при которой $\cos \varphi_1$ максимален, не зависит от высоты индуктора a_1 , но изменяется пропорционально D_2 и обратно пропорционально a_2 . После анализа нескольких семейств кривых, подобных приведенным на рис. 10, А. В. Шкульковым предложено эмпирическое выражение:

$$m_{2opt} = m_0 \Psi(D_2/a_2), \quad (27)$$

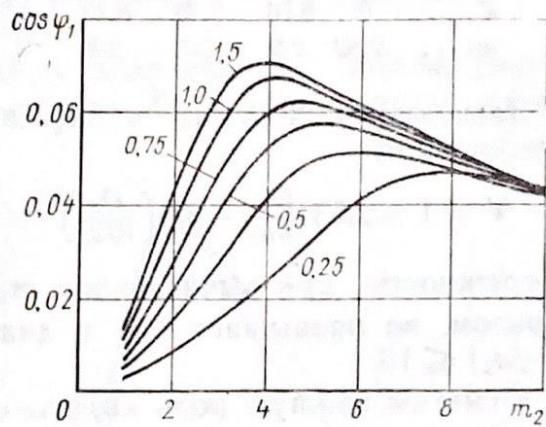


Рис. 10. Зависимость $\cos \varphi_1 = f(m_2)$ при разных относительных глубинах ванны a_2/a_1 и при постоянном отношении $a_1/D_1 = 0,25$ ($a_2/a_1 = 2,0$)

где $m_0 = m_{2\text{opt}}$ при $D_2/a_2 = 0$, т. е. относительный диаметр $m_{2\text{opt}}$ длинного цилиндра с $a_2 = \infty$. Условия нагрева такого цилиндра рассмотрены в предыдущем параграфе. На рис. 8 представлены зависимости $\cos \varphi_1(m_2)$, где $m_{2\text{opt}}$, обозначенные пунктирной линией, есть искомое m_0 в (27). Ниже приведены значения функции $m_0(K_3)$, полученные по графикам рис. 8,

$K_3 \dots$	0	0,16	0,28	0,44	0,64	0,81	0,86	0,94	0,97
$m_0 \dots$	2,52	2,6	2,7	2,8	3,0	3,5	3,8	4,7	6,0

Зависимость $\Psi(D_2/a_2)$ в выражении (27) аппроксимируется многочленом:

$$\Psi = 1 + 2,63 \frac{D_2}{10a_2} - 3,5 \left(\frac{D_2}{10a_2} \right)^2 + 4,15 \left(\frac{D_2}{10a_2} \right)^3 - 2,1 \left(\frac{D_2}{10a_2} \right)^4. \quad (28)$$

Погрешность при вычислениях $m_{2\text{opt}}$, проводимых подобным образом, не превышает 5 % в диапазоне $0,25 \leq K_3 \leq 0,9$ и при $(D_2/a_2) \leq 10$.

Отметим важную роль коэффициента K_3 , который влияет не только на $m_{2\text{opt}}$, но, что важнее, на самое значение $\cos \varphi_1$. На рис. 11 показаны зависимости $\cos \varphi_1(K_3; a_1/a_2)$ при постоянном m_2 . Производная $d(\cos \varphi_1)/dK_3$ положительная и тем больше, чем выше m_2 . С увеличением K_3 при любых m_2 значение

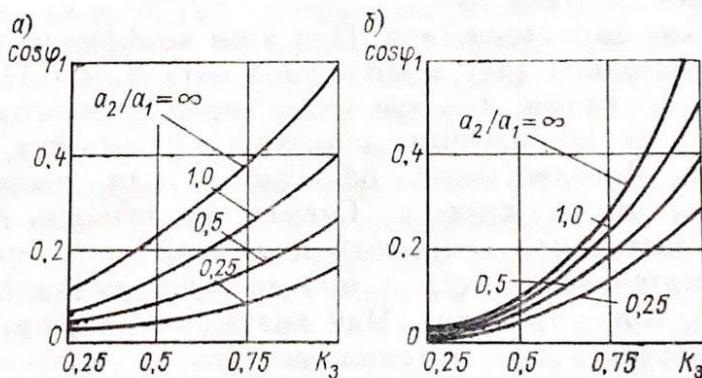


Рис. 11. Влияние коэффициента K_3 заполнения окна индуктора на $\cos \varphi_1$ при разных глубинах ванны a_2 : а — «холодная» ванна, $m_2 = 3$; б — «горячая» ванна, $m_2 = 10$

$\cos \varphi_1$ повышается, так как увеличивается потокосцепление с ванной, а поток рассеяния в воздушном зазоре уменьшается. Увеличение производной с увеличением m_2 объясняется более сильной связью ванны с индуктором при ярко выраженном поверхностном эффекте.

С помощью K_3 можно объяснить и количественно учесть влияние секций металлического тигля на $\cos \varphi_1$ и значение $m_{2\text{opt}}$. При наличии тигля

$$K_3 = \frac{S_2}{S_1 - S_c n} \approx \frac{1}{1 + (D_1^2 - D_t^2)/D_2^2}, \quad (29)$$

где S_2 — площадь горизонтального сечения ванны на уровне зеркала, м^2 ; S_c — площадь горизонтального сечения одной секции тигля, м^2 ; n — число секций.

Металлический тигель между индуктором и ванной сокращает площадь зазора, увеличивает K_3 и увеличивает $\cos \varphi_1$. Влияние металлического тигля на $\cos \varphi_1$ показано на рис. 12. Семейство пунктирных кривых подобно кривым, представленным на рис. 10, и отражает плавку в кварцевом тигле, который не влияет на магнитный поток. В этом случае $K_3 = 0,44$. Сплошные кривые построены на рис. 12 с учетом металлического тигля с $D_t = 120$ мм, при котором коэффициент $K_3 = 0,55$. Наличие такого тигля приводит к увеличению $\cos \varphi_1$ примерно в 1,5 раза, а также увеличивает значение $m_{2\text{opt}}$, которое возрастает с K_3 согласно (27). Нетрудно видеть, что именно секции тигля являются тем «инструментом», который может регулировать K_3 , а следовательно, изменять $m_{2\text{opt}}$.

У тиглей для садочных процессов имеется дно, а у тиглей для наплавочных процессов — головная часть затравки, аналог дна. В течение стартового периода и в начале рабочего периода

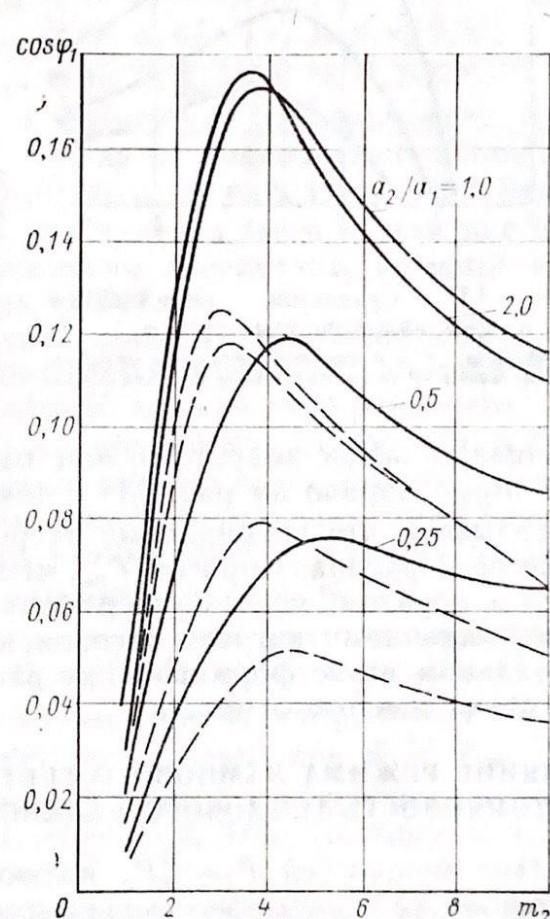


Рис. 12. Влияние металлического тигля на зависимость $\cos \varphi_1 (m_2)$:
— для печи без тигля; — для печи с металлическим тиглем. (Условие: $a_2/a_1=1,0$)

дно находится под индуктором или в его краевом поле. Если дно металлическое, то подобно любому короткозамкнутому контуру, оно деформирует и уменьшает магнитный поток индуктора, ухудшая условия нагрева вблизи своей поверхности.

На графиках рис. 13, построенных В. В. Неженцевым, показана сравнительная картина зависимостей $\cos \varphi_1(m_2)$ одной и той же индукционной системы: без дна (кривая 1), со сплошным медным дном (кривая 3) и с дном из набора незамкнутых колец (кривая 2). Наличие металлического дна снижает абсолютное значение $\cos \varphi_1$ и увеличивает $m_{2\text{opt}}$, т. е. действует так, как будто сокращает глубину ванны a_2 . Секционированное дно меньше влияет на $\cos \varphi_1$ и другие параметры системы, так как наведенные в нем токи существенно меньше раз-

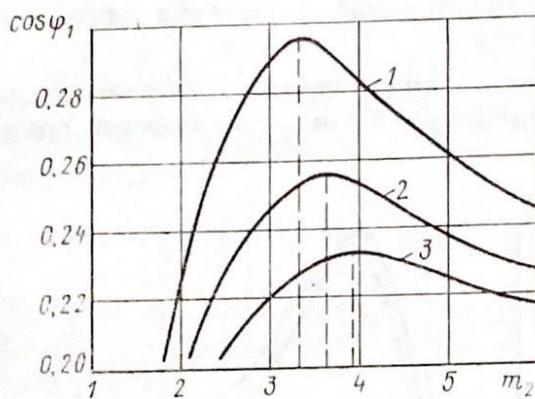


Рис. 13. Сравнение зависимостей трех индукционных систем:

1 – без дна; 2 – с секционированным металлическим дном; 3 – со сплошным металлическим дном

магничивают поток индуктора, чем токи в сплошном дне. Смещение $m_{2\text{opt}}$ вправо на рис. 13 с появлением металлического дна указывает, что оптимальный нагрев ванны требует большего перегрева расплава против $T_{\text{пл}}$, чем в тигле без дна.

Таким образом, можно утверждать, что дно является помехой индукционному нагреву оксидов прежде всего на старте и на начальном этапе формирования ванны, когда она мелкая, и когда $\cos \varphi_1$ ничтожно мал.

7. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЛАМПОВОГО ГЕНЕРАТОРА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ИПХТ

Баланс мощностей $P_2 = \sum P_n$ является необходимым, но недостаточным условием обеспечения устойчивого во времени процесса ИПХТ. Это объясняется тем, что P_2 , $\cos \varphi_1$, T_p и a_2 связаны функциональной зависимостью; если под влиянием внешней причины изменятся T_p или a_2 , то это может привести как к новому стационарному состоянию, так и к нестационарному режиму, чреватому прекращением нагрева. Следовательно, кроме известного условия баланса мощностей при ИПХТ должно быть обеспечено условие устойчивости этого баланса, которое можно записать так:

$$\frac{d \Sigma P_{\text{п}}}{da_2} > \frac{dP_2}{da_2} \text{ или } \frac{d \Sigma P_{\text{п}}}{dT_p} > \frac{dP_2}{dT_p}. \quad (30)$$

Обеспечение устойчивости теплового баланса является одной из главных трудностей при реализации индукционной плавки оксидов. Вычислительный эксперимент на модели индукционной печи без учета характеристик лампового генератора, питающего печь, дает условия устойчивости баланса, которые можно записать в следующем виде [2]:

$$d \Sigma P_{\text{п}}/dT_p > dP_2/dT_p$$

$$\text{при } m_2 < m_{2\text{opt}}, \text{ если } a_2 > 1,5 a_1; \quad (31)$$

$$\text{при } m_2 \geq m_{2\text{opt}}, \text{ если } a_2 \leq 1,5 a_1 \text{ и } K_3 \leq 0,65; \quad (32)$$

$$\text{при } m_2 > m_{2\text{opt}}, \text{ если } a_2 \leq 1,5 a_1 \text{ и } K_3 > 0,65. \quad (33)$$

Однако наблюдения в физических экспериментах показали, что условия (31) и (33) иногда не выполняются. Плавка может быть устойчивой при $m_2 < m_{2\text{opt}}$ и $a_2 < 1,5 a_1$ при различных значениях K_3 . Покажем, что причина этого — влияние нелинейности характеристик лампового генератора, который является источником питания печи ИПХТ.

При анализе используем зависимость колебательной мощности P_{\sim} от эквивалентного сопротивления R_s анодной нагрузки (рис. 14, а). Характер кривой и значение граничного эквивалентного сопротивления $R_{\text{гр}}$ не зависят от частоты и параметров нагрузки, но полностью определяются характеристиками и режимом лампы [11]. На рис. 14, а показаны качественные зависимости $P_{\sim}/P_{\sim\text{гр}}$ двух разных ламп: с плоским максимумом (кривая I) и с острым максимумом (кривая II).

Колебательный контур генератора является линейным элементом, следовательно, $P_2 \sim P_{\sim}$. Поэтому, если $dR_s/dT_p > 0$, то $dP_2/dT_p < 0$ может быть только при $R_s > R_{\text{гр}}$, и если $dR_s/dT_p < 0$, то $dP_2/dT_p < 0$ может быть только при $R_s < R_{\text{гр}}$.

Отметим, что зависимость $P_2(m_2)$ идентична зависимости $\cos \varphi_1(m_2)$ (см. рис. 12), если $K_3 \leq 0,65$. Поэтому при анализе одну можно заменить другой.

На рис. 14, б в относительных единицах показана зависимость $P_2(m_2)$, вычисленная для одной из конкретных печей ИПХТ при условии $a_2/a_1 = \text{const}$. Здесь же приведена соответствующая ей зависимость $R_s(m_2)$, вычисленная для параллельного колебательного контура, в котором указанная печь является индуктивностью. Точки A, B и C на первой кривой характеризуют режимы ИПХТ, которые по отношению к $m_{2\text{opt}}$ мы назвали заоптимальным, дооптимальным и оптимальным, соответственно. Сопротивления R_s колебательного контура при

этих режимах определяются точками A_1 , B_1 и C_1 на второй кривой.

Посмотрим, как изменяется вид зависимости $P_2(m_2)$ от того, при каком начальном m_2 выполняется исходный баланс и в каком режиме работает лампа.

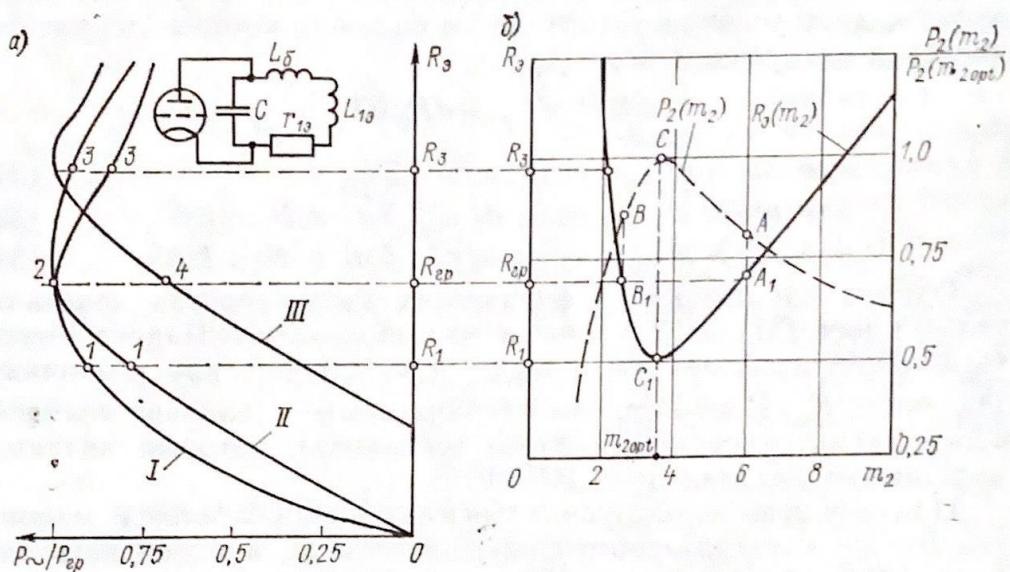


Рис. 14. Сопряжение нагрузочных характеристик генератора с зависимостью эквивалентного сопротивления $R_9(m_2)$ рабочего контура, нагруженного печью ИПХТ оксидов

Значение R_9 в точке A_1 определяет рабочую точку 2 или 4 на нагрузочной характеристике. Изменение T_p или (что то же) m_2 изменяет $R_9(m_2)$. При этом P_\sim лампы изменяется на $\Delta P_\sim(R_9)$. Это вызывает пропорциональное изменение $P_2(m_2)$. Общее выражение для $P_2(m_2, R_9)$ можно записать в следующем виде:

$$P_2(m_2, R_9) = P_2(m_2) \left[1 \pm \frac{\Delta P_\sim(R_9)}{P_\sim(R_{9A})} \right]. \quad (34)$$

Знак (+) или (-) получается в зависимости от направления изменения m_2 и положения рабочих точек на графиках $P_2(m_2)$ и $P_\sim(R_9)$. График зависимости P_\sim/P_{r0} (рис. 14, а) и график зависимости $R_9(m_2)$ (рис. 14, б) совмещены таким образом, что сопротивления R_9 в рабочих точках A_1 и B_1 заоптимального и дооптимального режимов печи равны R_{r0} , а R_9 оптимального режима печи в точке C_1 равно R_1 недонапряженного режима генератора в точке 1 (рис. 14, а).

Поставим вопрос: что происходит с зависимостью $P_2(m_2)$, если T_p уменьшается?

При заоптимальной плавке снижение T_p (или m_2) ведет к уменьшению R_s и к переходу лампы в недонапряженный режим. Мощность $P_\sim(R_s)$ снижается от точки 2 до точки 1. В соответствии с (34) снижается $P_2(m_2, R_s)$. При дооптимальной плавке снижение T_p ведет к увеличению R_s и к переходу лампы в режим перенапряженный. Мощность $P_\sim(R_s)$ также снижается, но от точки 2 к точке 3. Соответственно снижается $P_2(m_2, R_s)$. При оптимальной плавке снижение T_p ведет к увеличению R_s от R_1 до R_{tp} , к изменению режима от недонапряженного до граничного и к увеличению P_\sim и $P_2(m_2, R_s)$.

На рис. 15 и 16 представлены зависимости $P_2(m_2, R_s)$, построенные с учетом (34), положения рабочих точек A, B, C на характеристики $P_2(m_2)$, положения рабочих точек 1, 2, 3 на характеристиках $P_\sim(R_s)$ с учетом различия последних (кривые I и II). На всех графиках пунктирной кривой изображена исходная зависимость $P_2(m_2)$ исследуемой печи. Значение $P_2(m_{2\text{opt}})$ взято за норму для построения относительных зависимостей.

Результирующие кривые зависимостей $P_2(m_2, R_s)$, соответствующие плавкам в режимах A и B (см. рис. 14, б), изображены на рис. 15, б. Изменение $P_2(m_2, R_s)$ при снижении T_p соответствует ходу кривых влево от точек A и B . Исходная зависимость $P_2(m_2)$ существенно трансформируется: максимум при $m_{2\text{opt}}$ уплощается (кривая I), а на кривой II — даже «проваливается». Режим дооптимальной плавки остается неустойчивым, так как знак dP_2/dT_p не изменяется. Устойчивость заоптимальной плавки также не меняется.

Изменение положения рабочей точки A_1 или B_1 на нагрузочной характеристике, т. е. изменение режима лампы, осуществляется сдвигом характеристики вправо или влево по шкале R_s при изменении коэффициента обратной связи k лампы. При увеличении k зависимость $P_\sim(R_s)$ сдвигается влево; при уменьшении k — $P_\sim(R_s)$ сдвигается вправо, например, в положение кривой III (см. рис. 14, а). Рабочая точка A_1 (или B_1) оказывается в недонапряженном режиме. Этому состоянию соответствуют графики рис. 15, а.

Анализируя изменение $P_2(m_2, R_s)$ в 18-ти исследованных состояниях, можно сделать следующие заключения.

1. Напряженность режима лампы и форма нагрузочной характеристики существенно изменяют характер зависимости $P_2(m_2)$. Особенно велико изменение в недонапряженном режиме.

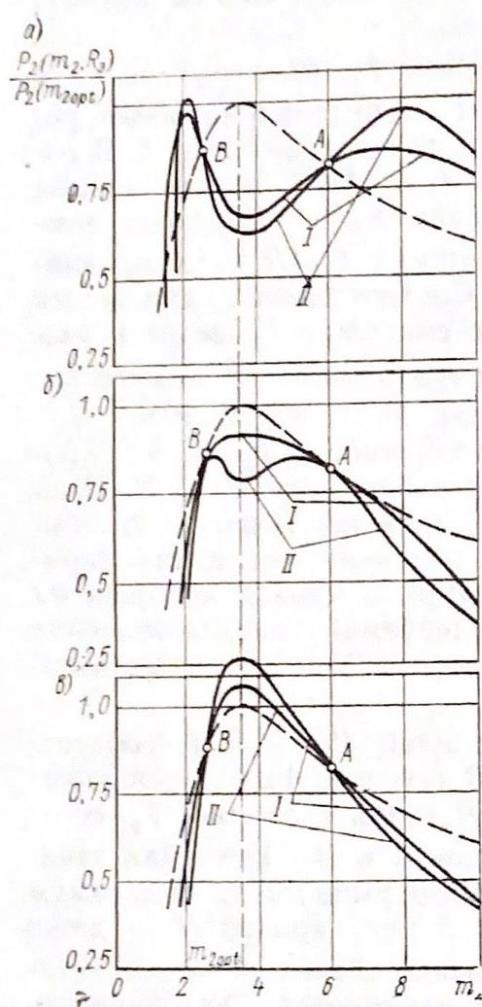


Рис. 15. Зависимости мощности $P_2(m_2, R_g)$ в расплаве при разных режимах генераторной лампы: *а* — недонапряженный режим лампы при $A_1 = R_1$ или $B_1 = R_1$; *б* — граничный режим при $A_1 = R_{gp}$ или $B_1 = R_{gp}$; *в* — перенапряженный режим при $A_1 = R_3$ или $B_1 = R_3$; I — при плоском экстремуме нагрузочной характеристики; II — при остром экстремуме

2. При плавке с $m_2 > m_{2opt}$ (точка *A*) в недонапряженном режиме баланс становится неустойчивым, в граничном режиме остается устойчивым, так как dP_2/dm_2 не изменяется, а в перенапряженном режиме — устойчивость повышается, так как модуль отрицательной производной dP_2/dm_2 увеличивается.

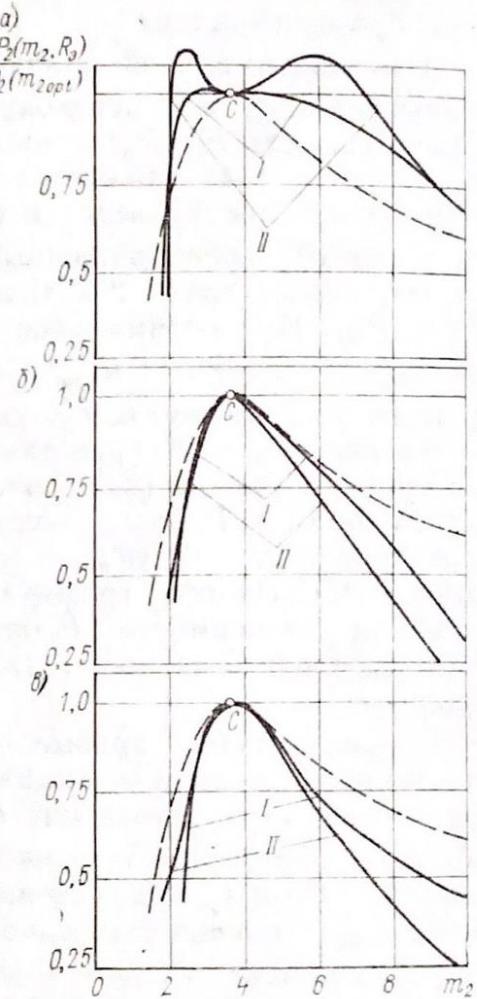


Рис. 16. То же, что на рис. 15, но для случая, когда $m_2 = m_{2opt}$:
а — при $C_1 = R_1$; *б* — при $C_1 = R_1$; *в* — при $C_1 = R_3$

3. При плавке с $m_2 \leq m_{2\text{opt}}$ (точки B и C) баланс устойчив только в недонапряженном режиме, причем тем устойчивее, чем острее экстремум $P_\sim(R_s)$.

Проведенный анализ и выводы сделаны применительно к печам с $K_3 \leq 0,65$, при которых зависимость $P_2(m_2)$ имеет экстремум. Для печей с $K_3 > 0,65$ зависимость $P_2(m_2)$ во всем диапазоне m_2 имеет $dP_2/dm_2 > 0$, поэтому устойчивость плавки в таких печах не очевидна [2]. При том же приеме построения зависимостей $P_2(m_2, R_s)$ с учетом нагрузочной характеристики генератора было проанализировано изменение $P_2(m_2)$ для трех случаев соотношения $m_2/m_{2\text{opt}}$ при трех возможных режимах генератора. Из анализа следует:

1. Если $m_2 > m_{2\text{opt}}$, то напряженность режима лампы практически не влияет на устойчивость теплового баланса, так как dP_2/dm_2 практически не изменяется.

2. Если $m_2 = m_{2\text{opt}}$, то в недонапряженном режиме $dP_2/dm_2 = 0$ и устойчивость улучшается; в граничном режиме dP_2/dm_2 не меняется; в перенапряженном режиме dP_2/dm_2 становится больше исходной, а устойчивость баланса ухудшается.

3. Если $m_2 < m_{2\text{opt}}$, то в недонапряженном режиме $dP_2/dm_2 < 0$ и баланс устойчив; в граничном режиме dP_2/dm_2 не меняется; в перенапряженном режиме $dP_2/dm_2 > 0$ и становится больше исходной, и устойчивость также ухудшается.

Таким образом, картина изменения $P_2(m_2, R_s)$ при $K_3 > 0,65$ с некоторыми отличиями повторяет изменения $P_2(m_2, R_s)$ при $K_3 \leq 0,65$. Поэтому общие рекомендации по обеспечению устойчивой ИПХТ оксидов можно сформулировать так:

следует плавить только в заоптимальном режиме при соотношении

$$m_2 = m_{2\text{opt}} + 0,5 \dots 2,0, \quad (35)$$

обеспечивая $a_2 \approx a_1$ и настраивая генератор на перенапряженный режим;

в тех случаях, когда по технологическим соображениям необходимо плавить в дооптимальном режиме (например, при варке стекол), требуется недонапряженный режим генератора и лампа с остроэкстремальной нагрузочной характеристикой.

В двухконтурных схемах, которые наиболее широко используют в генераторах установок ИПХТ, закономерности изменения $R_s(T_p)$ сохраняются. Рекомендации по выбору условий устойчивой плавки такие же, как при генераторе с одноконтурной схемой.

II. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ ОКСИДОВ В ХОЛОДНЫХ ТИГЛЯХ

8. ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ ИПХТ

В настоящее время электротехническая промышленность выпускает ряд высокочастотных установок для ИПХТ типа «Кристалл-400». Они построены по блочному принципу с использованием унифицированных узлов. Технические характеристики установок приведены в табл. 3 [12].

Установка «Кристалл-401—Фианит» (рис. 17) является первой промышленной установкой для ИПХТ оксидов. Она предназначена для выращивания монокристаллов по технологии, предложенной ФИАНом [13], и может быть использована так-

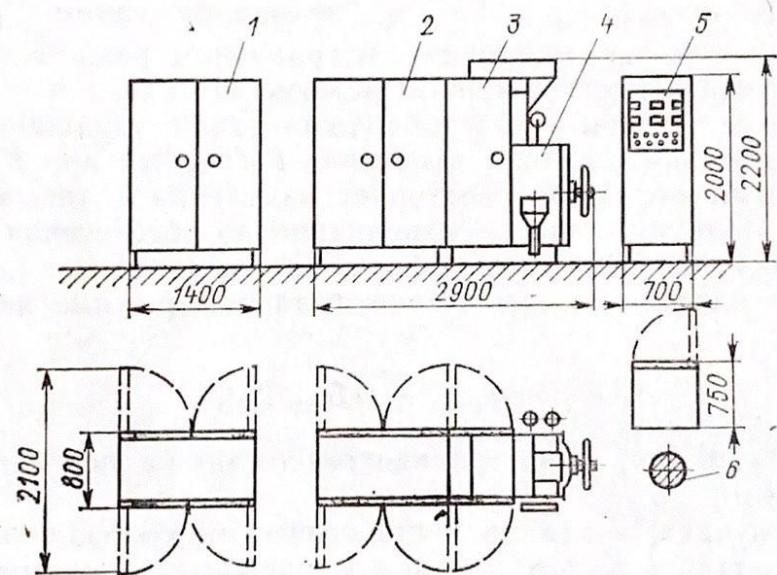


Рис. 17. Компоновка установки «Кристалл-401—Фианит»:

1 — выпрямитель; 2 — блок генератора; 3 — конденсаторная батарея; 4 — плавильная камера; 5 — шкаф автоматики и управления; 6 — место плавильщика

же для переплава оксидных порошков в кристаллические слитки, синтеза соединений, варки стекол и других работ с высокотемпературными расплавами.

Схема технологической части установки показана на рис. 18. Шихта из транспортного кубеля или по лоткам подается в

Таблица 3. Технические показатели установок ИПХТ

Показатели	Значения показателей установок			
	«Кристалл-401»	«Кристалл-402»	«Кристалл-403»	«Кристалл-405»
Установленная мощность, кВА	100	100	200	280
Колебательная мощность, кВт	690	60	160	160
Частота тока, МГц	5,28	5,28	1,76	1,76
Диаметр тигля внутренний, мм	200	150	400	500
Высота тигля, мм	300	250	700	1000
Рабочая температура расплава, К	3000	3200	2900	2900
Производительность, кг/ч:				
по фланитам	0,1	—	3,0	0,3
по плавленым оксидам	до 5	до 20	до 25	—
	6	6	10	—
Расход воды, м ³ /ч	0,02—20,0	1,0—20,0	0,02—10,0	0,005—0,5
Скорость рабочего хода, мм/мин	100	200	200	200
Установочная скорость, мм/мин	3,1	3,8	5,5	8,4
Масса установки, т	13	18	26	21
Площадь, занимаемая установкой, м ²				
				30

бункер 1, откуда с помощью дозатора 3 с регулируемым электроприводом 2 поступает в холодный тигель 5 с водораспределителем 4. Тигель может перемещаться относительно нагревающего индуктора 6 под действием электропривода рабочего перемещения 9, 10, 11 или электропривода установочного перемещения 9, 10, 12. Изменение рабочих скоростей перемещения равно 0,083—1,66 мм/мин.

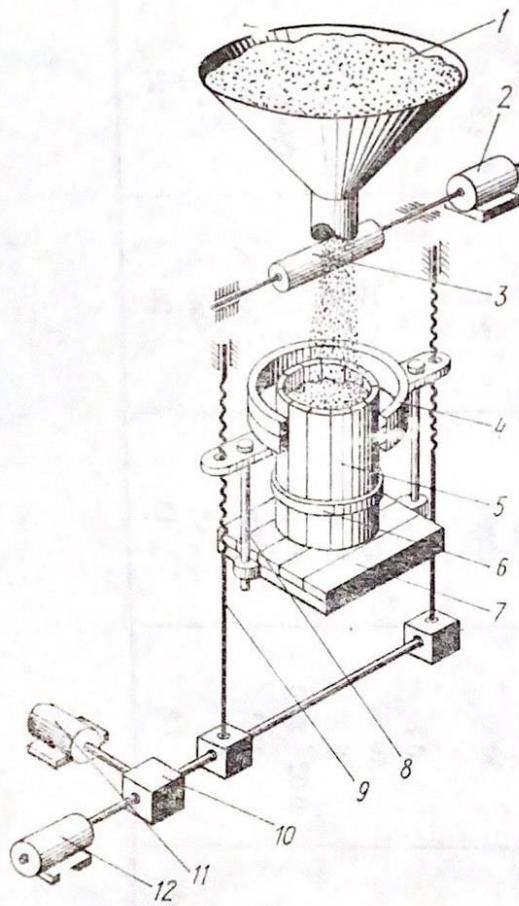


Рис. 18. Индукционная печь установки «Кристалл-401—Фианит»

при непрерывном наплавлении слитка, который разделяют на отрезки длиной от 0,75 до 1,2 м. При инепрерывном процессе увеличивается производительность, сокращается удельный расход шихтовых материалов и электроэнергии, повышается однородность и качество плавленого материала. Тонкий слиток диаметром до 110 мм удобен для дальнейшей разделки, дробления и измельчения. Это позволяет включить установку «Кристалл-402» в поточную линию производства плавленых порошков.

В соответствии с технологией выращивания моноцисталлов в печи осуществляют первоначальную загрузку шихты в тигель и закладку металла для стартового нагрева; нагрев и сжигание металла с образованием стартовой зоны расплава; наплавление ванны требуемого объема; направленную кристаллизацию расплава при опускании тигля относительно индуктора при неизменной мощности генератора.

Для разгрузки тигля 5 после выращивания кристаллов его поднимают вверх электроприводом 12, предварительно освободив крепления 8, удерживающие дно 7 тигля. Слиток остается на дне.

Установка «Кристалл-402» (рис. 19) предназначена для переплава порошков и синтеза соединений

Вследствие значительной высоты технологической линии блоки, составляющие установку, размещены на двух уровнях: генератор, блок рабочего контура, технологическая камера и блок управления — на эстакаде или втором этаже цеха, а блок выпрямителя и механизм вытягивания слитка — на первом этаже.

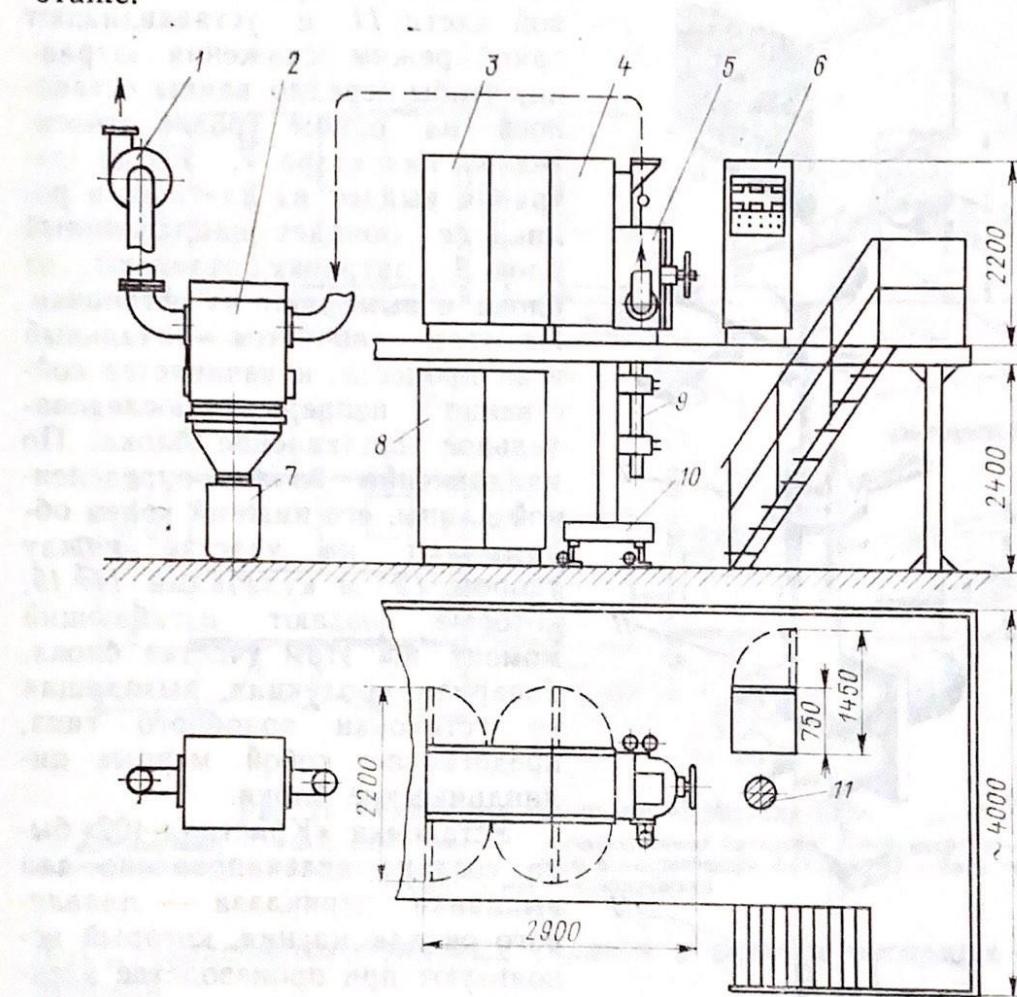


Рис. 19. Компоновка установки «Кристалл-402».

1 — вентилятор; 2 — рукачный фильтр; 3 — блок генератора; 4 — конденсаторная батарея; 5 — плавильная камера; 6 — шкаф автоматики; 7 — приемный контейнер фильтра; 8 — выпрямитель; 9 — наплавляемый слиток; 10 — механизм с роликовой клетью; 11 — место плавильщика

Непрерывно-последовательный процесс ИПХТ показан на рис. 20. Его схема напоминает схему процесса непрерывной разливки металлов. В исходном состоянии затравка 13 установлена в роликах тяущей клети 11 и замыкает снизу проходной тигель 8, который засыпан шихтой. Стартовым нагревом образуют первоначальную ванну и начинают индукционную плавку. На верхнем торце затравки имеется паз или водоохлажда-

мая петля, в которые затекает и кристаллизуется расплав, чем обеспечивают зацепление затравки с будущим блоком. Из бункера 1 через дозатор 2, 3 шихта по шихтопроводу 4 поступает в

тигель, плавится и наполняет ванну. После формирования ванны включают привод 10 роликовой клети 11 и устанавливают такой режим снижения затравки, чтобы зеркало ванны оставалось на одном уровне относительно индуктора 7. Когда затравка выйдет из клети, а в ролики ее попадет наплавленный блок 9, затравку отделяют от блока и вынимают из установки. На этом кончается начальный этап процесса, и начинается собственно непрерывно-последовательное наплавление блока. По наплавлении блока определенной длины, его нижний конец обламывают на участке между упором 12 и кулачками 14, 15, которые создают изгибающий момент на этом участке блока. Товарная продукция, выходящая из установки подобного типа, представляет собой мерные цилиндрические блоки.

Установка «Кристалл-402» была создана целенаправлено для выплавки периклаза — плавленого оксида магния, который используют при производстве электротехнических периклазовых порошков. В силу высокой упругости паров расплава оксида магния его плавка затруднительна: расплав выкипает даже при небольшом перегреве, а пары конденсируются на шихте в колошниковской зоне тигля. Здесь образуются своды и настыли, которые препятствуют нормальному

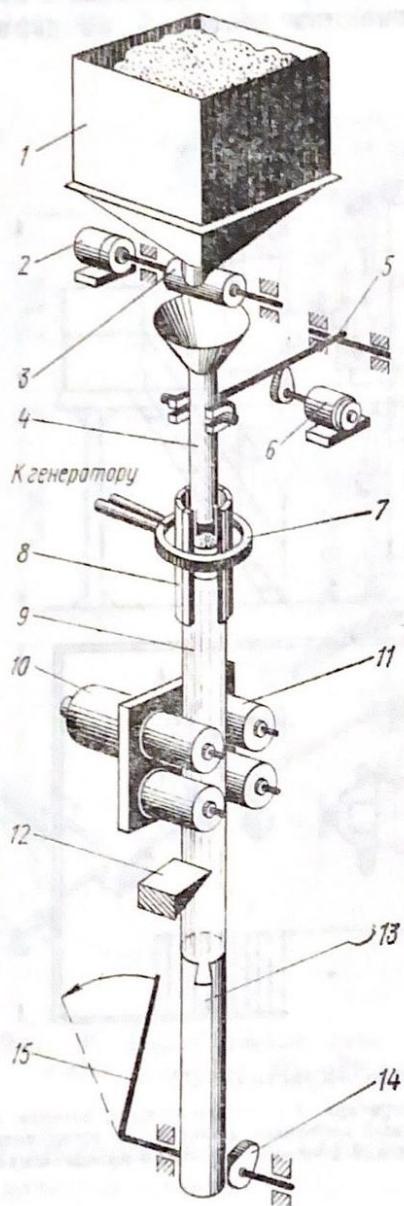


Рис. 20. Схема непрерывно-последовательного наплавления оксидного блока

перемещению шихты к зеркалу ванны, поэтому важным элементом печи является шуровка 4, которая одновременно служит шихтопроводом от дозатора к тиглю.

Своды и настыли удаляют шуровкой, совершающей возвратно-поступательные движения по оси тигля. Шуровкой можно работать как вручную, так и от электропривода 5, 6.

Хотя установка создавалась как специализированная, тем не менее она пригодна для ИПХТ любых оксидов или их смесей и успешно используется для производства плавленых Y_2O_3 ,

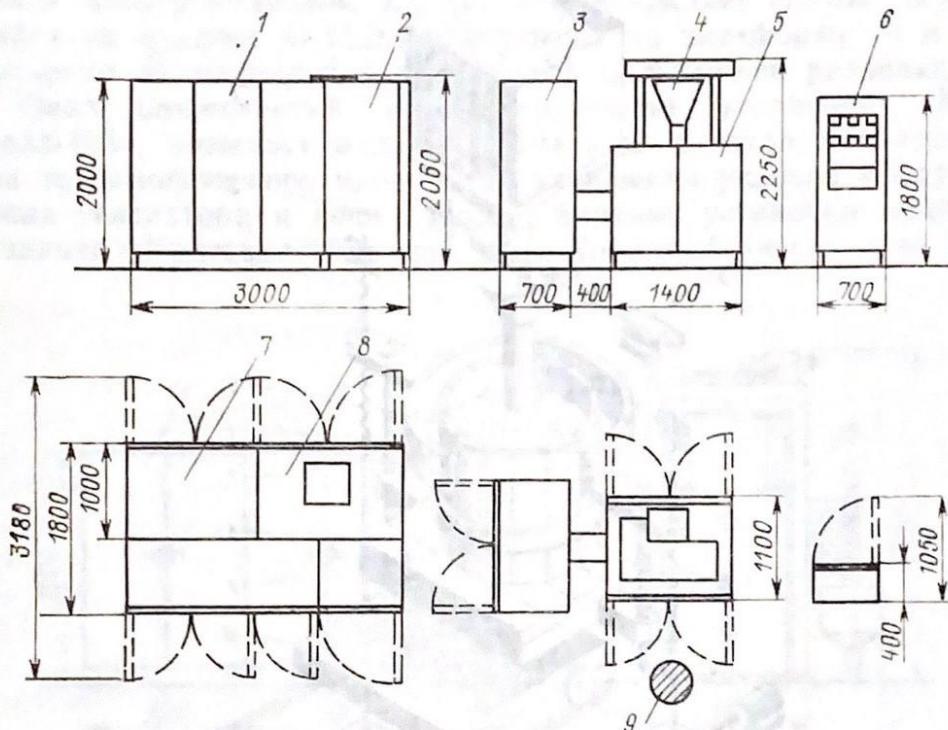


Рис. 21. Компоновка установки «Кристалл-403»:
1 – выпрямитель; 2 – блок управления; 3 – конденсаторная батарея; 4 – бункер; 5 – плавильная камера; 6 – шкаф автоматики; 7 – блок электрического фильтра; 8 – блок генератора; 9 – место плавильщика

Al_2O_3 , бадделеитокорундовых сплавов и синтеза оксидных соединений.

Завершая описание установки, отметим, что использование роликовой клети для перемещения слитка оказалось неудачным: валки проскальзывали по поверхности слитка, перекашивали и ломали его. Деформировался также сам тигель. После нескольких лет эксплуатации практически на всех установках «Кристалл-402» роликовую клеть пришлось заменить гусеничным механизмом.

Установка «Кристалл-403» (рис. 21) по назначению идентична установке «Кристалл-401—Фианит», но имеет большую мощность. В ней используют тигель объемом 36 дм³, что позволяет получить ванну расплава до 15 дм³. Увеличение объема жидкости позволяет получать монокристаллы фианитов массой

до 1,0 кг с более совершенной структурой, а поликристаллические плавленые оксиды с равноосным зерном, что важно, например, при производстве абразивных материалов. Более равновесные условия кристаллизации позволяют проводить синтез соединений без метастабильных и неравновесных фаз. Большая

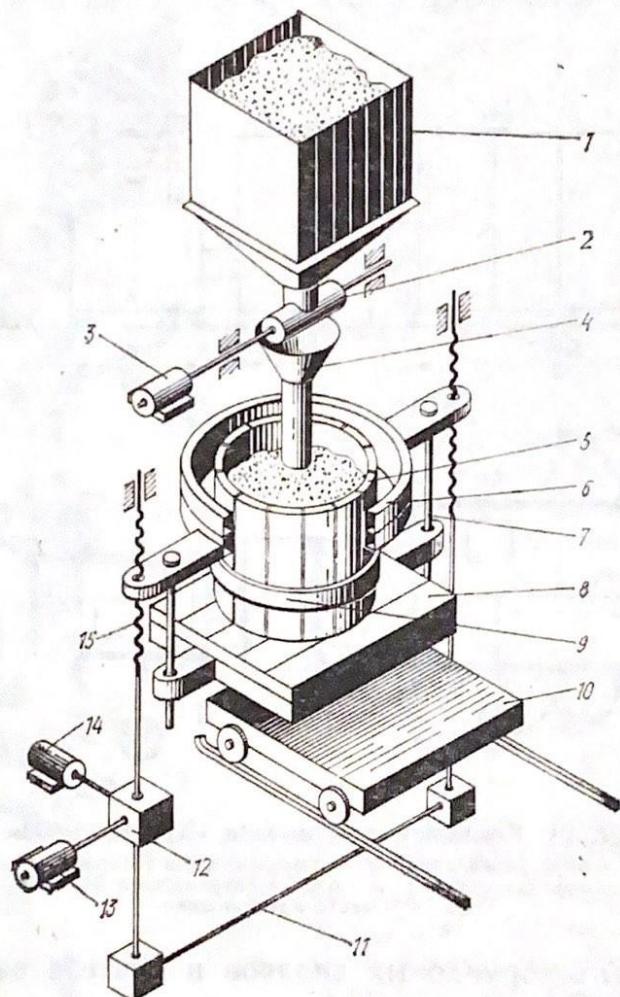


Рис. 22. Устройство печи установки «Кристалл-403»:

1 — бункер; 2 — питатель; 3 — привод питателя; 4 — шихтопровод; 5 — тигель; 6 — коллектор; 7 — крепление тигля к поддону 8; 9 — индуктор; 10 — платформа; 11, 12, 13 — механизмы привода рабочего хода; 14 — электродвигатель привода винтовой пары; 15 — винтовая пара

мощность генератора открывает дополнительную возможность перегревать расплав и организовать плавку с выпуском его для литья или раздува в гранулы и нити.

Устройство печи показано на рис. 22. Порядок технологических процедур такой же, как на установке «Кристалл-401—

Фианит». Для стартового нагрева в большом тигле требуется большое количество металла, в полном соответствии с рекомендациями п. 2. Поскольку масса наплавленного слитка достигает 100—150 кг, извлечь его из тигля и из камеры вручную невозможно. Поэтому в печи предусмотрена выкатная платформа 10. Тигель 5, смонтированный на коллекторе 6, поднимается вверх с помощью винтовых пар 15, приводимых в движение электроприводом 12, 13, и освобождает слиток, остающийся на поддоне 8. Поддон опускают на платформу 10 и выкатывают из плавильной камеры для дальнейшей разделки.

Опыт, накопленный при эксплуатации установки «Кристалл-403», позволил модернизировать ее в части автоматизации технологического процесса и улучшения условий обслуживания генератора и печи. Новый вариант установки получил название «Кристалл-405» (рис. 23). Холодный тигель печи уве-

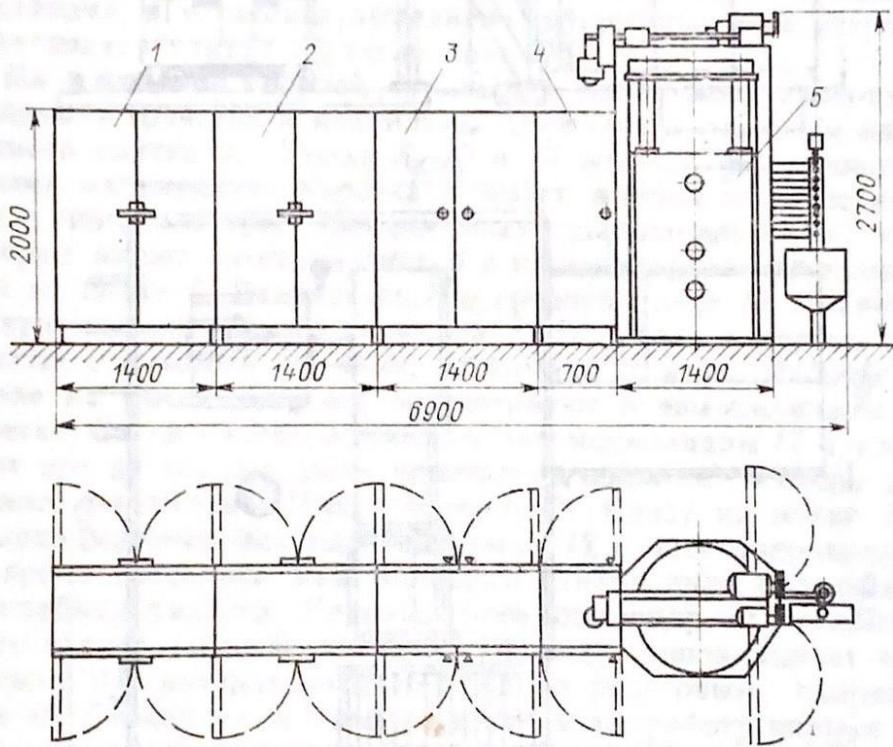


Рис. 23. Компоновка установки «Кристалл-405»:
— выпрямитель; 2 — фильтр; 3 — блок генератора; 4 — конденсаторная батарея; 5 — ростовая камера

личен в объеме примерно в три раза. Снижена минимальная рабочая скорость и увеличена ее стабильность. Компоновка печи осталась такой же, как на рис. 22, с тем отличием, что исключены бункер для шихты, дозатор и шихтопровод-шурковка.

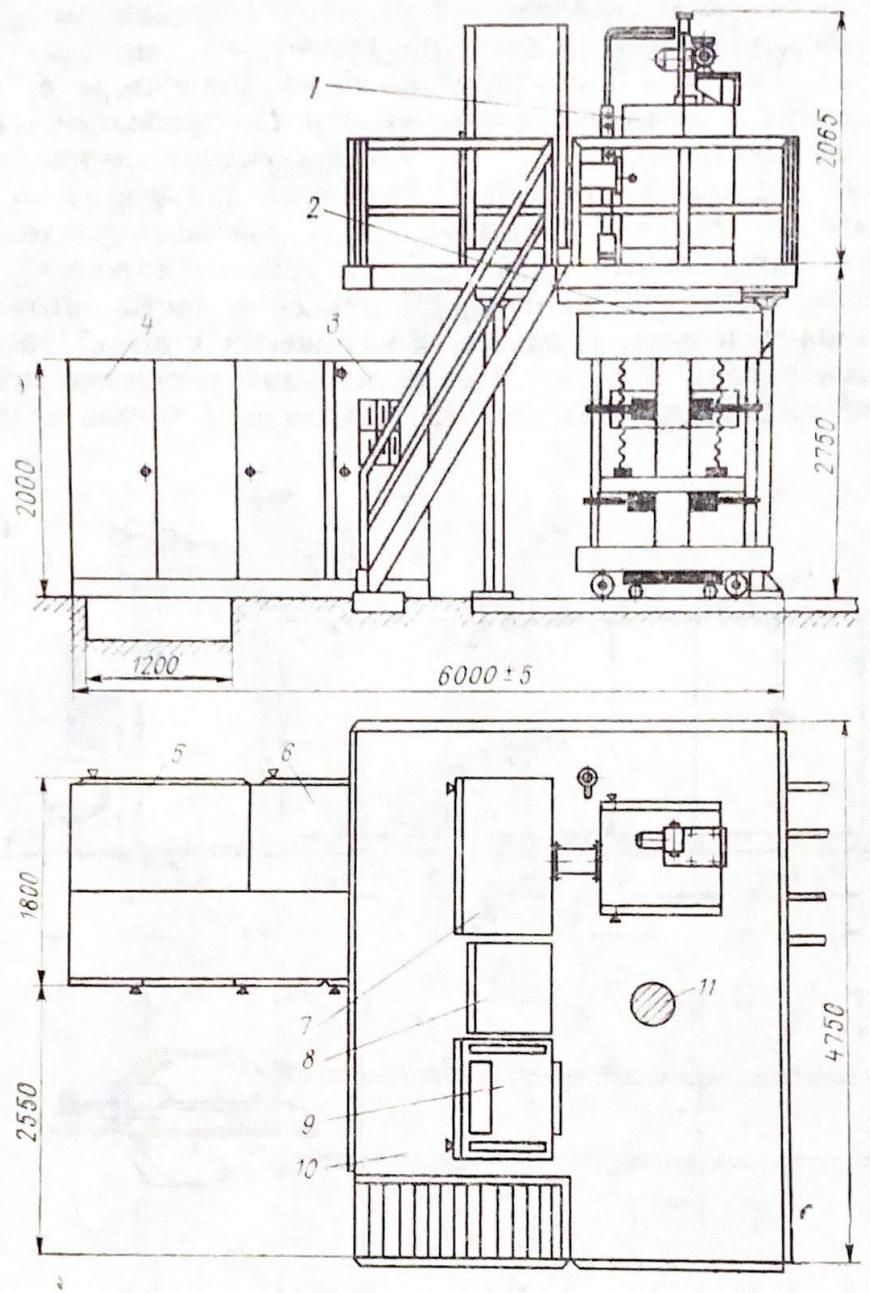


Рис. 24. Компоновка установки «Кристалл-406»:
 1 — плавильная камера; 2 — вытягивающее устройство; 3 — блок управления; 4 — выпрямитель;
 5 — генератор; 6 — фильтр; 7 — конденсаторная батарея; 8 — программируемый контроллер;
 9 — шкаф автоматики; 10 — эстакада; 11 — место плавильщика

Перечисленные устройства не требуются, потому что при загрузке тигля и формировании ванны используют ранее плавленый материал (отходы предыдущих плавок), а не исходные порошки.

Изменения имеются и в электрической схеме генератора (ее описание будет сделано ниже).

На базе высокочастотного генератора установки «Кристалл-403» с учетом опыта эксплуатации «Кристалл-402» создана установка «Кристалл-406» для непрерывно-последовательного наплавления поликристаллического оксидного слитка с производительностью примерно в три раза большей, чем у «Кристалл-402». Основное назначение установки — переплав порошковых оксидов и синтез сплавов и соединений. Общая компоновка и габариты ее показаны на рис. 24.

Учитывая недостатки роликовой клети и проблематичность удержания слитка массой до 500 кг с помощью гусеничного механизма, в установке выполнено совершенно иное устройство вытягивания слитка из тигля (рис. 25).

На массивной сварной «этажерке» на четырех уровнях размещены устройства и механизмы движения и разделки наплавляемого слитка 4. Полки 5, 10 и 15 жестко фиксированы в призме «этажерки». Каретка 8 имеет вертикальное перемещение с помощью трех прецизионных шарико-винтовых пар 7, которые имеют электропривод 6 с цепной передачей, размещенной на полке 5. В каретке 8 и средней полке 10 установлено по три пневматических цилиндра 9, 11, штоки которых, снаряженные стальными пятками, обжимают слиток. Рабочее движение на высоту 500 мм обеспечивают пневмоцилиндры 9 на каретке. Затем слиток обжимают пневмоцилиндры 11 идерживают его до тех пор, пока каретка не поднимется вверх до исходного положения. Цикл повторяется. Снизу на полке 10 укреплена маятниковая дисковая пила 12 с электроприводом 13. Во время остановки наплавленного слитка пила надрезает его на глубину радиуса. Ударный пневмоцилиндр 14 отломывает часть слитка высотой примерно 700 мм и опрокидывает его на тележку 17, которая откатывается по рельсовым направляющим 19. Сигнал на останов рабочего хода, работу пилы и ударного механизма 14 поступает от фотореле 16, датчики которого размещены на платформе 15. Сжатый воздух для пневмомеханизмов обеспечивает заводская магистраль, давление в которой должно быть $6 \cdot 10^5$ Па (6 кгс/см²). Для профилактики и ремонта вся «этажерка» может выкатываться из-под печи по рельсовым путям 18. Очередность процедур, включений и отключений механизмов обеспечивает система автоматического управления, которая базируется на программируемом контроллере типа ПК-128.

Промышленная эксплуатация установок для ИПХТ оксидов показала, что наиболее уязвимым элементом их является холдный тигель. Средний срок службы тигля без ремонта составляет 3 недели до замены одной или нескольких его секций.

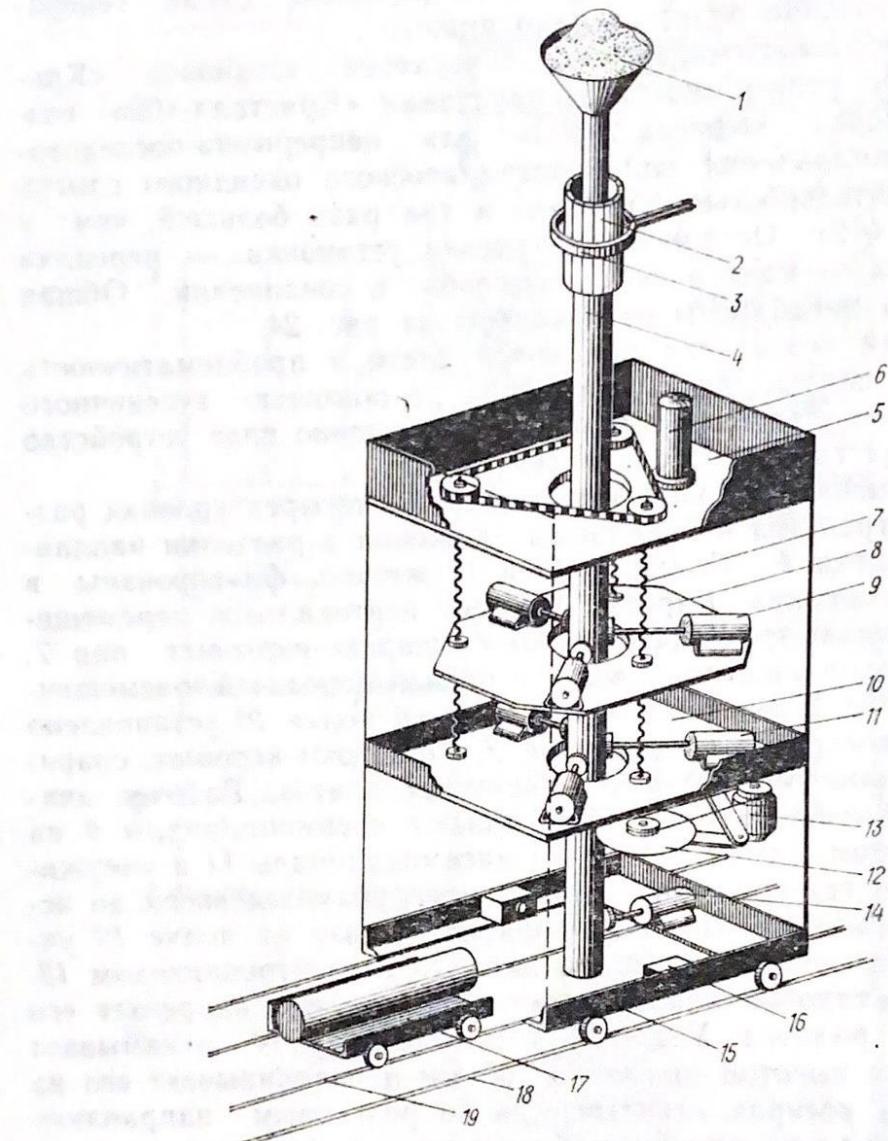


Рис. 25. Устройство вытягивания слитка в печи установки «Кристалл-406»:
1 – бункер с шихтой; 2 – холдный тигель; 3 – индуктор

Типичной причиной выхода секций из строя является их эрозия вследствие электрических разрядов в зазорах. Причиной разрядов являются легко ионизируемые газы продуктов диссоциации сернистых или хлористых соединений, попадающих в плавку вместе с шихтой, обычно после обогащения или химической очистки ее.

Другой причиной выхода из строя секций тигля являются соли, выделяющиеся из охлаждающей воды и забивающие каналы охлаждения секций. Поскольку другие элементы установки (генераторная лампа, катушки индуктивности), как и тигель, нуждаются в интенсивном охлаждении проточной водой, нужно строго соблюдать технические нормы на используемую воду. Вода должна иметь температуру не выше 30°C, жесткость не выше 8,5 мг-экв/л и удельное электрическое сопротивление не менее 4000 Ом · см. Давление на входе в систему охлаждения должно быть не ниже 0,15 МПа.

Причиной электрических пробоев в высоковольтных цепях установки часто является пыль. Принудительная вентиляция засасывает много пыли внутрь блоков, где она оседает на электроэлементах и создает дополнительную поверхностную проводимость. Требуется еженедельная профилактика внутри установки с очисткой силовых цепей от пыли. Необходимо использовать также общепринятые меры борьбы с запыленностью.

9. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЛАМПОВОГО ГЕНЕРАТОРА И АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВОК ИПХТ

Выбор схемы лампового генератора и режимов его работы определяется широким диапазоном изменения параметров состояния ванны расплава и, как следствие, широким изменением электрических параметров индукционной системы. Действительно, от стартового нагрева до рабочего стационарного режима ИПХТ выходные параметры генератора меняются следующим образом:

мощность, выделяющаяся в индукторе, увеличивается от десятков ватт до десятков и сотен киловатт, т. е. на три порядка;

напряжение на индукторе снижается от 3—8 кВ до 1—2 кВ, т. е. в 3,0—4,0 раза, что определяется увеличением $\cos \varphi_1$ индуктора на один-два порядка;

резонансная частота нагрузочного контура увеличивается на 25—30 %, а частота генератора возрастает на 10—15 %, вместо разрешенного увеличения на 2,5 %; причиной является снижение индуктивности нагруженного индуктора в 1,5—2,0 раза;

добротность нагрузочного контура снижается в 10—50 раз и равняется нескольким единицам, вследствие увеличения вносимого активного сопротивления на два порядка.

Сюда следует добавить рекомендации, указанные в п. 7, настраивать генератор на перенапряженный режим в зависимости от соотношения $m_2/m_{2\text{opt}}$.

Таким образом, ламповый генератор, предназначенный для питания печи ИПХТ, должен иметь глубокую регулировку ко-

лебательной мощности и выходного напряжения, иметь подстройку рабочей частоты и широкий диапазон изменения коэффициента обратной связи.

Во всех установках ИПХТ оксидов используется двухконтурная схема генератора с автотрансформаторным подключением нагрузочного контура к анодному контуру. На рис. 26 показана электрическая схема генератора установки «Кристалл-405» как типичная. Напряжение на нагрузочном контуре меньше, чем на анодном, и определяется соотношением индуктивностей $L_2/(L_1 + L_2)$, которые являются частями индуктивности анодного контура переменными по значению. Значения L_1 и L_2 зависят от пространственного положения управляющей короткозамкнутой катушки $L_{кз1}$. С ее помощью коэффициент автотрансформации по напряжению можно изменять в пределах от 1,1 (при стартовом нагреве) до 2,0 (при рабочих режимах плавки).

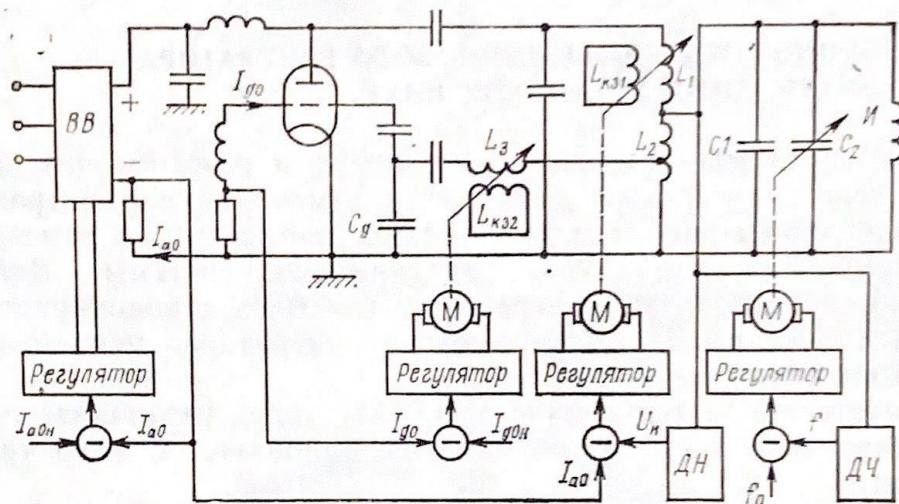


Рис. 26. Электрическая принципиальная схема автоматического управления режимом генератора в установке «Кристалл-405»

Необходимые условия возбуждения автогенератора обеспечиваются обратной связью на сетку лампы с емкости C_d . Регулирование напряжения на сетке осуществляют изменением индуктивности L_3 с помощью короткозамкнутой катушки $L_{\text{вн}}$.

Настройку рабочей частоты генератора для введения ее в допустимый диапазон ($f_{раб} \pm 2,5\%$) осуществляют увеличением переменной емкости C_2 в рабочем контуре.

При эксплуатации установок ИПХТ так же, как при создании систем автоматического управления ими, всегда возникает вопрос: какой параметр или группа параметров режима генера-

тора лучше всего характеризует состояния ванны и указывает на возникшие в ней тенденции? Однозначного ответа не существует. Однако можно отметить некоторые прямые связи параметров состояния и параметров режима генератора. Так, частота генератора является исключительно чувствительной функцией изменения объема расплава в ванне. Возрастание частоты свидетельствует об увеличении объема. Снижение частоты — о превалировании процесса кристаллизации над процессом плавления. Цифровой частотомер, включенный в схему, служит чутким индикатором тенденции в ванне.

Другой пример. Садочная плавка с большим перегревом расплава имеет ванну постоянного объема. Температура расплава прямо связана с выделяющейся мощностью, и индикатором состояния может служить напряжение на индукторе или его ток.

Если перегрев расплава невелик и глубина ванны переменна, то индикатором и регулятором состояния ванны может служить постоянная составляющая анодного тока лампы [14].

Из всей гаммы установок ИПХТ лишь предназначенные для синтеза монокристаллов фианитов имеют замкнутые системы автоматического регулирования параметров. Регулирующим воздействием в установках первых выпусков было переменное напряжение накала генераторной лампы. Однако недостатком такого управления режимом является низкий КПД лампы (не более 65 %). Поэтому в установках мощностью более 60 кВт применяют только регуляторы анодного напряжения.

Генератор с печью ИПХТ является многопараметровой управляемой системой. Однако она может быть представлена совокупностью однопараметровых подсистем, например, подсистем регулирования частоты, обратной связи, мощности или напряжения и т. д. В работе [14] указаны критерии оптимального функционирования каждой подсистемы.

Критерий оптимальности межконтурной связи — максимальное отношение напряжения на индукторе U_1 к постоянной составляющей анодного тока I_{a0} :

$$U_1/I_{a0} = \text{max.}$$

Критерий оптимальности уровня обратной связи, соответствующего требуемой мощности генератора:

$$I_{\text{дон}} = \text{const.}$$

Здесь $I_{\text{дон}}$ — номинальное значение постоянной составляющей сеточного тока в амперах.

Критерий оптимальности регулируемой колебательной мощности:

$$I_{\text{дон}} = \text{const.}$$

Здесь $I_{\text{ан}}$ — номинальное значение постоянной составляющей анодного тока в амперах.

Критерий стабильности частоты:

$$f_0 = \text{const.}$$

С использованием названных критериев построена система автоматического управления ламповым генератором установки «Кристалл-405» (рис. 26). Включенный в систему регулирующий микропроцессорный контроллер («Ремиконт») позволяет осуществлять автоматическую работу установки по программе, начиная от включения накала лампы до рабочего перемещения холодного тигля. Надежность работы «Ремиконта» повышена «горячим» резервированием его систем и элементов.

В заключение отметим, что в установке «Кристалл-406» также использован программируемый контроллер типа ПК-28, позволяющий по заложенной программе осуществлять перемещение слитка и его разделку. Датчиками чередования операций являются исполнительные элементы: концевые выключатели и фотореле. На лицевой панели блока автоматики имеется мнемосхема технологического процесса, снабженная светодиодами, отображающая очередь исполнения операций.

10. ЛАБОРАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ИПХТ ОКСИДОВ

Наличие стандартных ламповых генераторов с подходящими техническими характеристиками, простота конструкции печи и расчета условий плавки послужили основой широкого использования ИПХТ в исследовательской практике. Лабораторные установки ИПХТ оксидов разнообразны и многочисленны. В качестве иллюстрации к сказанному коротко опишем только три из них.

Установка ИПХТ-4. Предназначена для плавки на блок порошковых оксидов и для химического синтеза оксидных соединений [15]. Установка создана на базе высокочастотного лампового генератора типа ВЧИ-60/5,28-ИГ мощностью 60 кВт с частотой 5,28 МГц. Технологическая часть установки — индукционная печь (рис. 27) выполнена в виде камеры 7 и несущего каркаса 4, внутри которого перемещается по вертикали подвижная рама 12 с затравкой 11. Затравку вводят внутрь тигля 9 с индуктором 8 и начинают плавку. Шихта из бункера 5 с помощью питателя 6 по шихтопроводу поступает в расплавленную ванну. Перемещением рамы 12 с затравкой 11 наплавляемый слиток 10 вытягивается из зоны плавления. Рабочий ход рамы со скоростями 0,5—20 мм/мин обеспечивает электропривод 1 с ходовым винтом 2. Установочное движение со скоростью 200 мм/мин выполняется от электропривода 3.

Установка ИПХТ-4 послужила макетом для отработки технологии переплава порошков с непрерывным вытягиванием наплавленного блока, заложенной в установку «Кристалл-402». Поэтому в технологических схемах обеих установок много общего.

Установка выращивания монокристаллов методом Чохральского. Предназначена для получения монокристаллов ортоферритов — оксидных соединений типа MeFeO_3 (здесь Me — редкоземельный металл или иттрий), которые используются как материалы микроэлектронной техники [16]. Основную проблему совмещения метода Чохральского — лучшего метода выращивания монокристаллов — и метода ИПХТ оксидов составляет трудность обеспечения необходимого соотношения $P_k > P_i$. Здесь P_k — мощность тепловых потерь от расплава теплопроводностью вдоль кристалла; P_i — мощность тепловых потерь излучением с открытого зеркала расплава. При плавке оксидов соотношение не выполняется, так как T_p велика, а теплопроводность оксидов низкая. Под кристаллом происходит аккумулирование теплоты, расплав в мениске нагревается относительно остального зеркала, и затравка отрывается от расплава.

В установке, схема которой показана на рис. 28, названную проблему преодолевают тем, что излучение с зеркала расплава вокруг кристалла компенсируют встречным потоком лучистой энергии трех дуговых ксеноновых ламп, размещенных в фокусах эллиптических отражателей. Свет лампы распределен по поверхности расплава, но не попадает на мениск и на кристалл. Следует добавить, что нагрев концентрированным светом выполняет в данной технологии функцию стартового нагрева шихты перед ИПХТ.

В установке использован холодный тигель с внутренним диаметром 80 мм и с высотой загрузки 40 мм. Тигель может

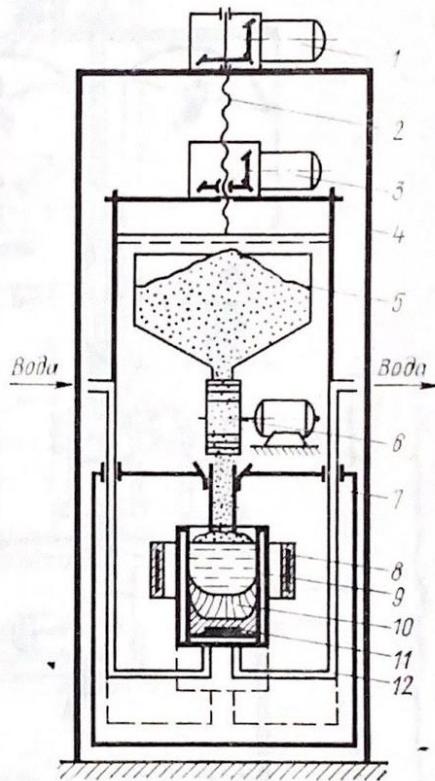


Рис. 27. Индукционная печь лабораторной установки ИПХТ-4

вращаться вокруг оси со скоростью до 100 об/мин. Индуктор печи питается от лампового генератора мощностью 20 кВт с частотой 1,76 МГц. Дуговые лампы мощностью по 10 кВт каждая обеспечивают суммарную мощность светового потока до 3 кВт.

В такой печи выращивают кристаллы ортоферритов диаметром 25 мм и длиной до 50 мм.

Установка «ИПХТ-6». Предназначена для варки стекла с выработкой стекломассы [17], а также для плавки оксидных материалов с выпуском расплава струей. Выработку стекломассы осуществляют, например, для производства стеклофиты; выпуск оксидного расплава — с целью литья в изложницу или форму, или с целью раздува струи в гранулы или волокна. Источником питания установки служит ламповый генератор типа ВЧГ 11-63/1,76. Индукционная печь (рис. 29) размещена в просторном стальном шкафу 1 с бункером для порошков 2 и с горловиной вытяжной вентиляции 3. Водоохлаждаемый тигель 4 подвешен на консолях на высоте 750 мм от пола. Тигель представляет собой прямоугольный параллелепипед, собранный из вертикальных трубок, которые вварены в коллекторы подвода и слива воды. Внутреннее сечение тигля в плане 400×120 мм,

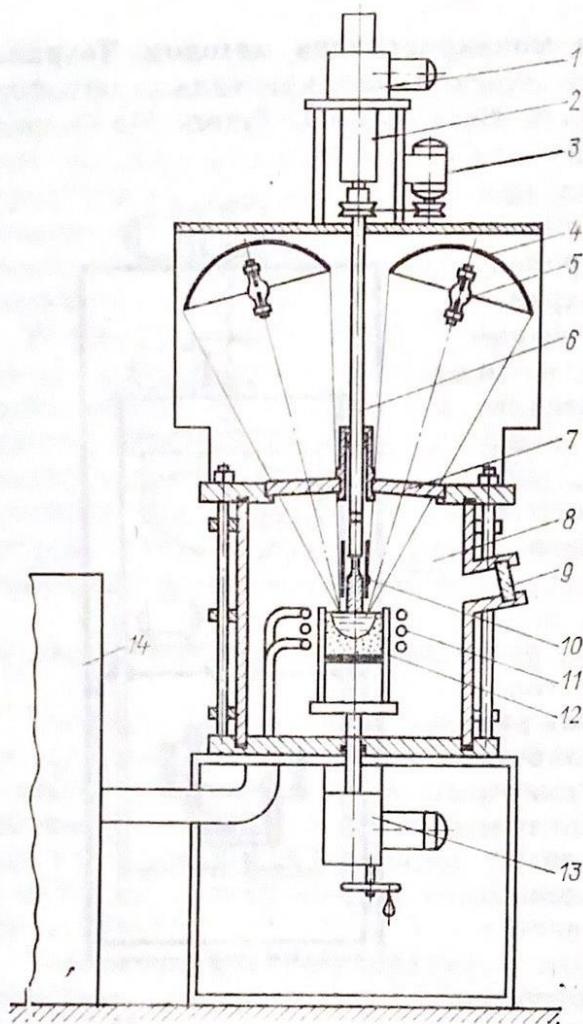


Рис. 28. Схема установки с комбинированным индукционным и радиационным нагревом расплава в холодном тигле:

1 — привод перемещения штока 6; 2 — винтовая пара; 3 — привод вращения штока; 4 — отражатели; 5 — дуговые лампы; 7, 9 — кварцевые окна; 8 — камера; 10 — печь отжига; 11 — индуктор; 12 — холодный тигель; 13 — привод перемещения тигля; 14 — генератор

ляет собой прямоугольный параллелепипед, которые вварены в коллекторы подвода и слива воды. Внутреннее сечение тигля в плане 400×120 мм,

глубина ванны — до 150 мм. Двухвитковый индуктор 5 охватывает тигель с неравномерным зазором. Против сливного носка тигля зазор увеличен до 50 мм. Шины токоподвода 10 соединяют индуктор с конденсаторной батареей 11 нагрузочного контура генератора.

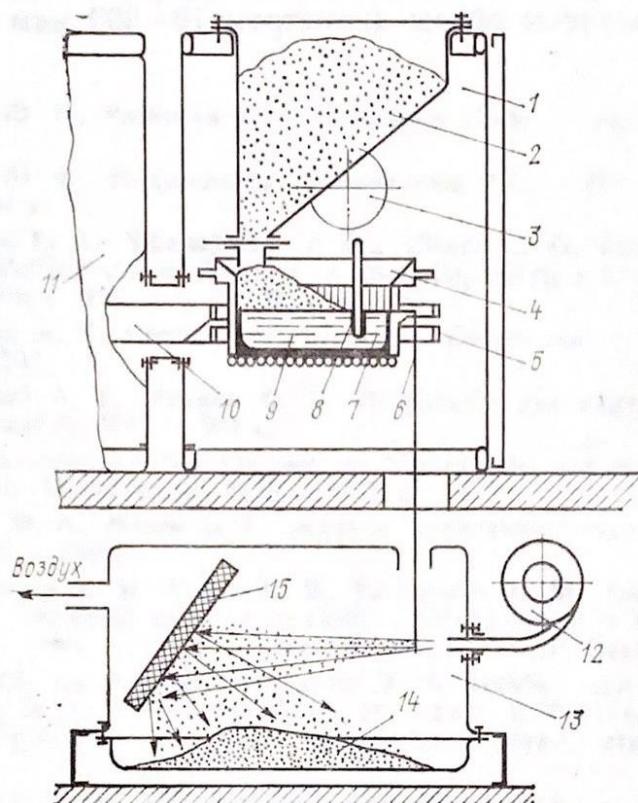


Рис. 29. Индукционная печь и камера раздува струи расплава в установке ИПХТ-6

Поскольку назначением плавки является подготовка расплава определенных кондиций (химический состав, вязкость, температура), в полости тигля выполнены две сообщающиеся зоны: плавильная 9 и выработочная 7, разделенные водоохлаждаемой перегородкой 8. Плавильная зона завалена шихтой и относительно горячее выработочная зона, которая имеет открытое зеркало и потому остывает больше. Отсюда подготовленный расплав вытекает через сливной носок струей 6 диаметром 1—3 мм.

Через отверстие в перекрытиях струя попадает в нижележащее помещение, где размещена металлическая камера раздува 13. Поток сжатого воздуха из компрессора 12 диспергирует

струю расплава в гранулы или волокно. Отбойная стенка 15 из плавленолитого огнеупорного материала сбрасывает гранулы на поддон 14. Если продуктом дисперсии являются волокна, то вместо стенки 15 устанавливают сетку из стальной проволоки. Если в печи варят стекло для фритты, то струю выпускают в бассейн с водой. Производительность установки по силикатному стеклу — 18 кг/ч, по плавленому бакору — 12 кг/ч, при этом получены сферы диаметром 10—300 мкм [18].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Ю. Б., Ратников Д. Г. Холодные тигли. — М.: Металлургия, 1972. — 103 с.
2. Петров Ю. Б. Индукционная плавка окислов. — Л.: Энергоатомиздат, 1983. — 104 с.
3. Monforte F. R., Swanekamp F. W., Uitert L. G. Radio Frequency Technique for Pulling Oxide Crystals without Employing a Crucible Susceptor. // J. Appl. Phys. — 1961. — V. 32, N 5. — P. 959.
4. Chapman A. T., Clark G. W. // J. Amer. Ceram. Soc. — 1965. — V. 48, N 3. — P. 484—502.
5. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. — Л.: Энергия, 1974. — 204 с.
6. Физико-химические свойства окислов. Справочник под ред. Г. В. Самсонова. — М.: Металлургия, 1978. — 472 с.
7. Маурах М. А., Митин Б. С. Жидкие тугоплавкие окислы. — М.: Металлургия, 1979. — 288 с.
8. Александров В. И., Осико В. В., Татаринцев В. М. Синтез лазерных материалов из расплава методом прямого ВЧ-плавления в холодном контейнере. — М., 1968. — 51 с. — Препринт/ФИАН СССР, Заказ № 20.
9. Установки индукционного нагрева: Учеб. пособие для вузов/ А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунэр; Под ред. А. Е. Слухоцкого. — Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. — 328 с.
10. Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — 455 с.
11. Васильев А. С., Гуревич С. Г., Иоффе Ю. С. Источники питания электротермических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 248 с.
12. Промышленное высокочастотное оборудование для индукционной плавки в холодных тиглях/ В. М. Бындии, И. А. Канаев, В. И. Добровольская, Ю. Б. Петров и др. // Огнеупоры. — 1983. — № 2. — С. 41—45.
13. Получение высокотемпературных материалов методом прямого высокочастотного плавления в холодном контейнере/ В. И. Александров, В. В. Осико, А. М. Прохоров, В. М. Татаринцев// Успехи химии. — 1978. — Т. 47. Вып. 3. — С. 385—427.
14. Бындий В. М., Добровольская В. И., Ратников Д. Г. Индукционный нагрев при производстве особо чистых материалов. — Л.: Машиностроение, 1980. — 64 с.
15. Петров Ю. Б., Шкульков А. В., Шурыгина И. В. Индукционная плавка в холодных тиглях окисных огнеупорных материалов// Огнеупоры. — 1980. — № 10. — С. 41—46.
16. Балбашов А. М., Червоненкис А. Я. Магнитные материалы для микроэлектроники. — М.: Энергия, 1979. — 216 с.

17. Петров Ю. Б., Лопух Д. Б., Печенков А. Ю. Варка стекла с непрерывной выработкой в индукционной печи с холодным тиглем// Труды 15-го Международного конгресса по стеклу. Том 3а. Технология стекла и его применение. — Л.: Наука, 1989. — С. 72—77.

18. Получение высокочистых кристаллических оксидных материалов индукционной плавкой в холодном тигле/ Ю. Б. Петров, А. В. Шкульков, А. Ю. Печенков, В. Н. Ветров, Б. А. Игнатенков// Высокочистые вещества. — 1989. — № 3. — С. 136—140.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
I. Характеристика индукционной плавки оксидов и условий ее обеспечения	6
1. ИПХТ оксидов как электротермический процесс. Классификация и специфика	—
2. Стартовый нагрев	12
3. Проблема модели ИПХТ	15
4. Тепловой баланс и термический КПД	17
5. Критерий оптимального электрического режима ИПХТ	21
6. Влияние конструкции печи на $\cos \varphi_1$ и $t_{2\text{opt}}$	26
7. Влияние режима лампового генератора на устойчивость теплового баланса ИПХТ	30
II. Оборудование для индукционной плавки оксидов в холодных тиглях	36
8. Промышленные установки ИПХТ	—
9. Особенности работы лампового генератора и автоматизация установок ИПХТ	47
10. Лабораторные установки ИПХТ оксидов	50
Список литературы	55

2 р.

5 ПЕТРОВ Ю. Б., КАНАЕВ И. А.
Индукционные печи
для плавки оксидов

ПОЛИТЕХНИКА

- 1** ГЛУХАНОВ Н. П. Физические основы высокочастотного нагрева
- 2** ДЕМИЧЕВ А. Д. Поверхностная закалка индукционным способом
- 3** ГОЛОВИН Г. Ф., ЗИМИН Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева
- 4** ИВАНОВ В. Н., КОСТЫЛЕВ А. Н., ЧЕРЕВАЦКИЙ Л. М., ЧИРКО В.Э. Машины преобразователи частоты для электротермии

- 6** ВОЛОГДИН В. В., КУЩ Э. В., АСАМОВ В. В. Индукционная пайка
- 7** КНЯЖЕВСКАЯ Г. С., ФИРСОВА М. Г., КИЛЬКЕЕВ Р. Ш. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов
- 8** ФЕДОРОВА И. Г., БЕЗМЕНОВ Ф. В. Высокочастотная сварка пластмасс
- 9** БЫНДИН В. М., ДОБРОВОЛЬСКАЯ В. И., РАТНИКОВ Д. Г. Индукционный нагрев при производстве материалов методом кристаллизации
- 10** ДАШКЕВИЧ И. П. Высокочастотные разряды – промышленное применение
- 11** ФОГЕЛЬ А. А. Индукционный метод удержания металлов во взвешенном состоянии
- 12** СЛУХОЦКИЙ А. Е. Индукторы
- 13** КАЧАН Ю. П., МОРГУН В. В. Тиристорные преобразователи частоты
- 14** ИВАНОВ В. Н., ЛУНИН И. В., КУЛЖИНСКИЙ В. Л. Высокочастотная сварка металлов
- 15** ВАСИЛЬЕВ А. С. Ламповые генераторы для высокочастотного нагрева
- 16** НЕМКОВ В. С., ПОЛЕВОДОВ Б. С., ГУРЕВИЧ С. Г. Математическое моделирование устройств высокочастотного нагрева