



Тема 2. Конструкции и тепловая работа печей

Лекция 8

§ 11. Вращающиеся трубчатые печи

Это агрегаты непрерывного действия с рабочим пространством в виде пустотелого цилиндра, в которых из-за небольшого наклона печи и ее вращения вокруг продольной оси сыпучие материалы перемещаются вдоль печи, нагреваясь за счет теплоты сжигания топлива.

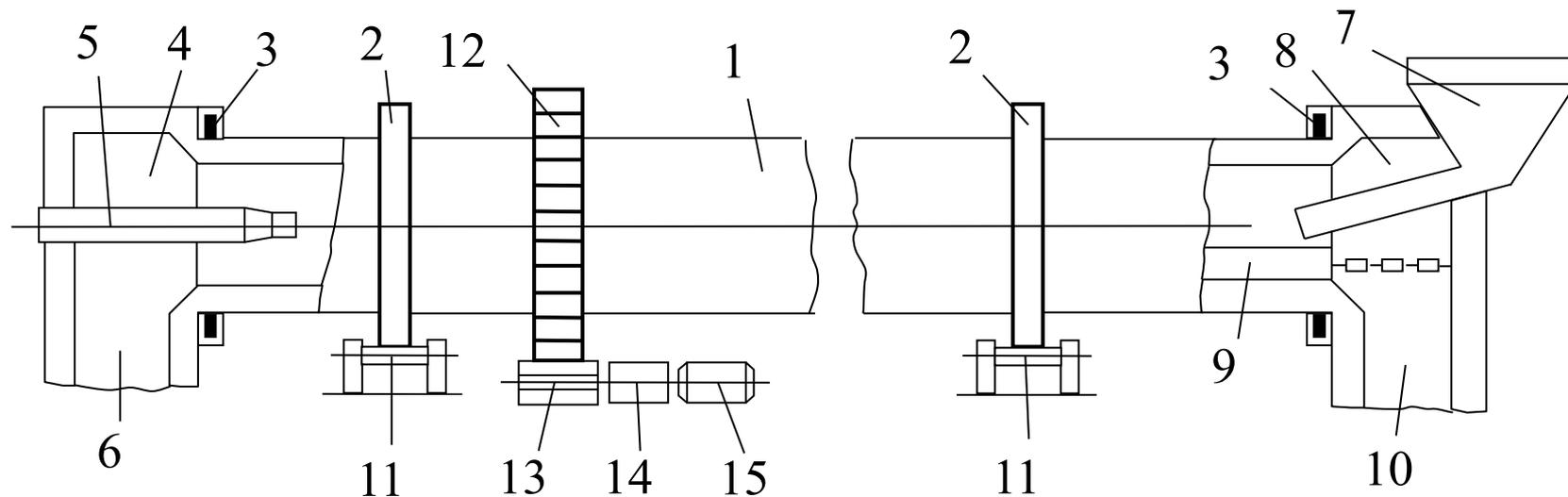
Используются для углетермического восстановления отходов цинкового производства (так называемый процесс вельцевания), спекания сырья алюминиевой промышленности - нефелинов и бокситов (гидрат глинозема Al_2O_3), кальцинации гидроксида алюминия (разложения содержащегося в минерале известняка $CaCO_3$), обезвоживания карналлита, обжига ртутьсодержащих материалов, сушки различных промежуточных продуктов черной и цветной металлургии.

Обычно эти печи работают в режиме противотока.

Шихта подается в верхнюю (хвостовую) часть печи и медленно движется навстречу продуктам сгорания, образующимся при сжигании топлива в головной части агрегата. Из нижней части перерабатываемые продукты в виде спека или раскаленного порошкообразного материала поступают в холодильник, а продукты сгорания направляются в систему пылеочистки.

Топливо - природный газ, мазут или твердое топливо: коксовая мелочь, угольная пыль. Топливосжигательные устройства, соответственно, двухпроводные горелки, форсунки и пылеугольные горелки.

По классификации ОТП агрегаты являются печами-теплообменниками с переменным по длине печи режимом тепловой работы. На участке, где происходит горение топлива, осуществляется радиационный режим работы. По мере продвижения продуктов сгорания по длине печи и их охлаждения режим тепловой работы постепенно становится конвективным.



Вращающаяся трубчатая печь: 1 - барабан; 2 - бандаж; 3 - уплотнительные устройства; 4 - топочная камера; 5 - форсунка; 6 - канал, по которому спек пересыпается в холодильник; 7 - загрузочное устройство; 8 - загрузочная камера; 9 - отбойное устройство; 10 - газоотводящий канал; 11 - опорные ролики; 12 - венцовая шестерня; 13 - привод барабана; 14 - редуктор; 15 - электродвигатель

Барабан диаметром 3-5 м и длиной до 150 м сварен из листового железа и футерован шамотом.

На наружной поверхности барабана закреплены бандажи (кольца), которые опираются на ролики, укрепленные на железобетонных фундаментах таким образом, что барабан имеет уклон около 3° .

Электродвигатель обеспечивает вращение барабана со скоростью порядка 1 об./мин. Электромагнитным колодочным тормозом печь можно остановить.

Верхний торец печи входит в загрузочную камеру; сухую шихту загружают с помощью шнекового питателя через патрубок, а содержащую до 40 % влаги пульпу - через пульповую трубу ковшом-дозатором. Чтобы шихта не налипала на стенки барабана, используют отбойное устройство, представляющее собой связки рельсов, прикрепленных цепью к стенке загрузочной камеры.

Уплотнительные устройства состоят из входящих друг в друга лабиринтных колец, приваренных к барабану и камерам печи. Чтобы холодный воздух, попадающий в кольцевой канал лабиринтного уплотнения, не проникал далее в печь, его удаляют из кольцевого канала с помощью эксгаустера (на слайде 30 - не показано).

В топочной камере может быть установлено 3-5 форсунок, расположенных под углом к оси барабана, чтобы уменьшить унос материала из печи. Высокотемпературные зоны печи вблизи горелок делают из магнезитовых и хромитовых огнеупоров.

Под печью обычно устанавливают холодильник, тоже представляющий собой барабан, в котором спек охлаждается движущимся навстречу воздухом, используемым затем для сжигания топлива.



*Вращающаяся
трубчатая
печь,
построенная
ООО Хэнанской
компанией
горного
механизма
«Хунцзи», КНР*



*Вращающаяся
трубчатая печь,
построенная
Чжэнчжоуйской
тяжелопромышленной
компанией ООО
«Zoneding», КНР*

При вращении барабана находящийся в печи материал поднимается на некоторую высоту и пересыпается вниз. Происходит теплообмен между горячими дымовыми газами и все время обновляющейся поверхностью материала. Теплообмену способствует и то, что шихта попадает на поверхность, нагретую за тот период, когда она была свободна от слоя материала. Эти обстоятельства определяют высокую интенсивность теплообмена в рабочем пространстве печи.

Теплота в ЗТП поступает за счет одновременного протекания всех 3 видов теплообмена: излучением от факела и футеровки, конвекцией от продуктов сгорания и теплопроводностью от поверхности кладки, по которой непрерывно перемещается перерабатываемый материал.

В печах для вельцевания часть энергии генерируется непосредственно в ЗТП за счет окисления углерода и образующихся при переработке шихты паров металлического цинка.

Температурный режим вращающихся печей не изменяется во времени и определяется химическим и фракционным составом перерабатываемых материалов.

В качестве примера рассмотрим температурный режим печи для кальцинации гидроксида алюминия, в которой условно можно выделить 4 зоны по ходу движения шихты:

1) сушки шихты и удаления гидратной влаги:

$$t_{\Gamma} = 200-700 \text{ }^{\circ}\text{C}, t_{\Psi} = 20-300 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

2) кальцинации, где происходит полное разложение известняка:

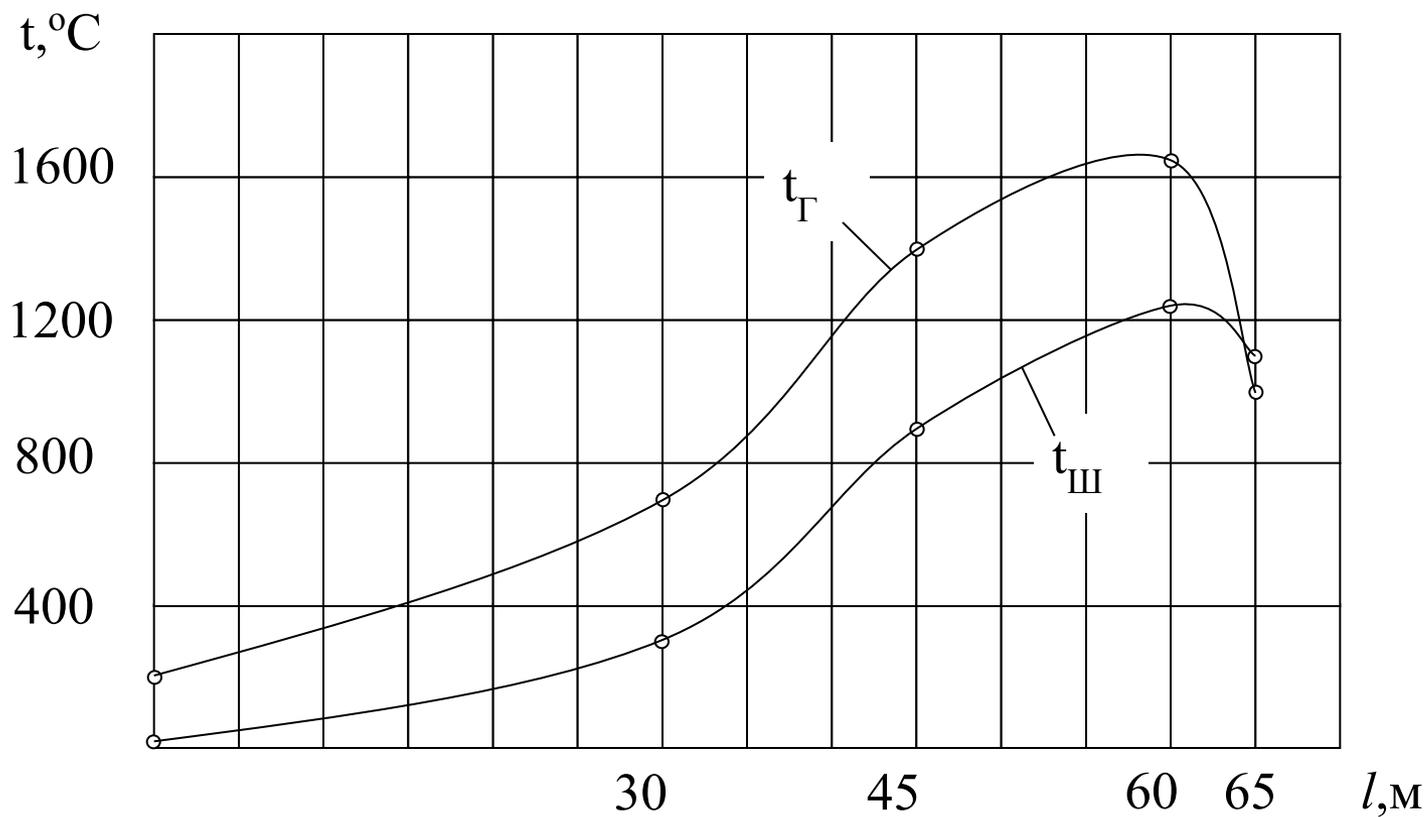
$$t_{\Gamma} = 700-1400 \text{ }^{\circ}\text{C}, t_{\Psi} = 300-900 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

3) спекания шихты (зона находится в пределах длины факела):

$$t_{\Gamma} = 1400-1650 \text{ }^{\circ}\text{C}, t_{\Psi} = 900-1250 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

4) охлаждения (за факелом, в самой нижней части барабана):

$$t_{\Gamma} \text{ уменьшается до } 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ а } t_{\Psi} \text{ - до } 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$



*Температурный режим печи
для кальцинации гидроксида алюминия*

Производительность печи составляет около 10 т/ч спека диаметром 40-50 мм при расходе энергии порядка 10 МДж/кг продукта.

Достоинства печей:

- 1) относительная простота конструкции;
- 2) возможность включения в непрерывную технологическую линию;
- 3) более интенсивное по сравнению с неподвижным слоем протекание тепло- и массообменных процессов.

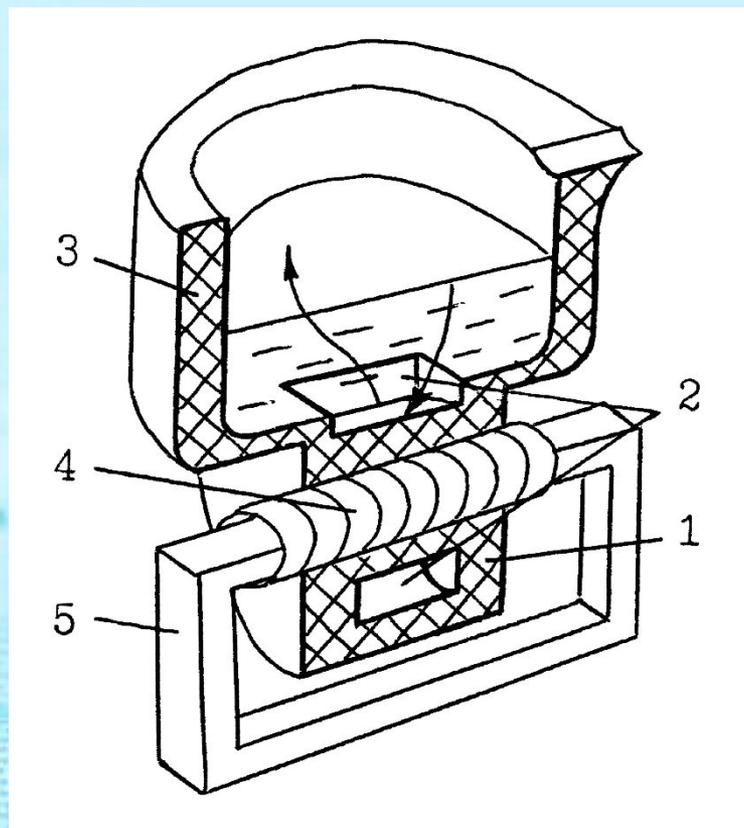
Недостатки:

- 1) низкий термический к.п.д.;
- 2) значительный пылевынос;
- 3) сложность установки контрольно-измерительных приборов.

§ 12. Электрические печи цветной металлургии

Индукционные плавильные печи предназначены для переплава и рафинирования, а также используются в качестве копильников для хранения и перегрева перед разливкой следующих металлов и сплавов на их основе: Zn, Cu, Ni, Al, Au, Mg.

Схема канальной
индукционной печи:
1 - подовый камень,
2 - канал,
3 - плавильная ванна,
4 - индуктор,
5 - магнитный сердечник



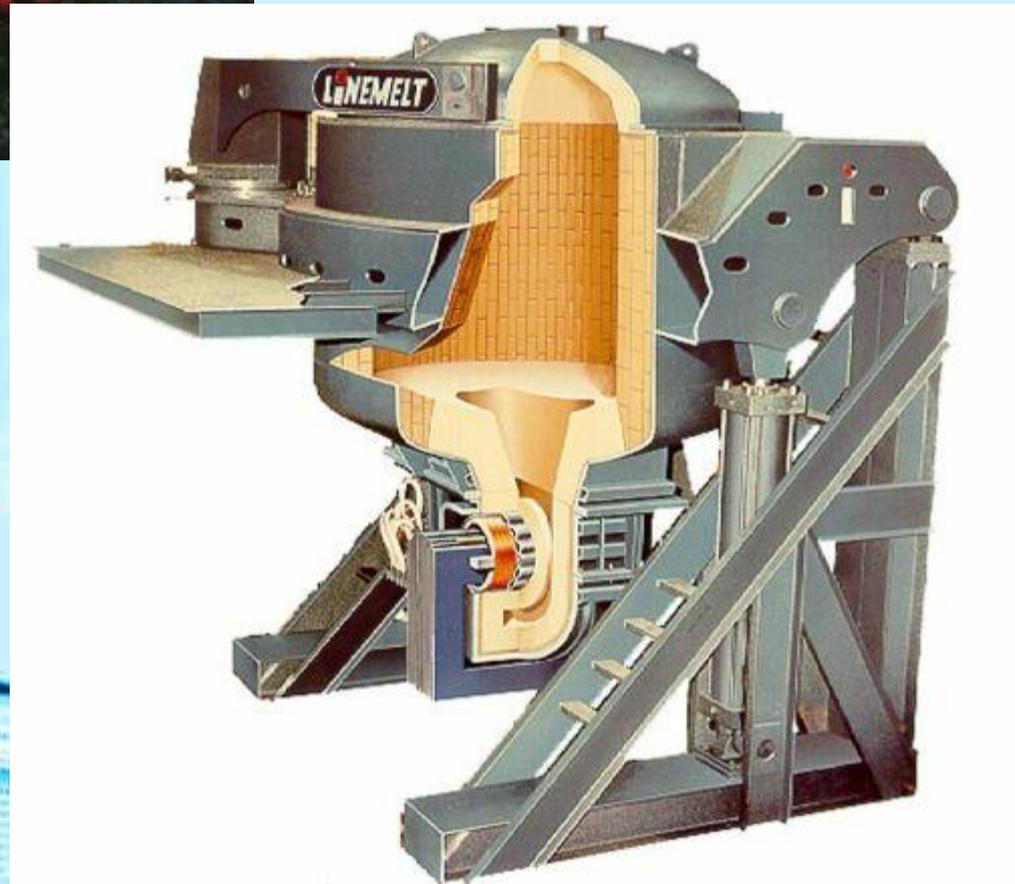
Чтобы повысить стойкость подового камня, его делают из торкрет-масс на основе кварца, шамота, магнезита и корунда (в зависимости от свойств жидкого металла).

Многовитковый индуктор, намотанный на стержень замкнутого магнитопровода, создает цилиндрические электромагнитные волны, падающие на внутреннюю поверхность металла в кольцевом канале.

Радиальный поток энергии обеспечивает необходимую теплогенерацию и создает электродинамическое воздействие на жидкий металл в виде сжимающего эффекта. Вследствие этого происходит перемешивание металла канала и ванны из-за электродинамической конвекции, дополняемой естественной конвекцией в результате теплогенерации в канале, где металл на 100-200 К более горячий. Таким образом, это печи-теплогенераторы с электрическим режимом тепловой работы канала, а не всей ЗТП.



*Современные
индукционные
нагреватели*



*Канальная
индукционная
печь Linemelt*



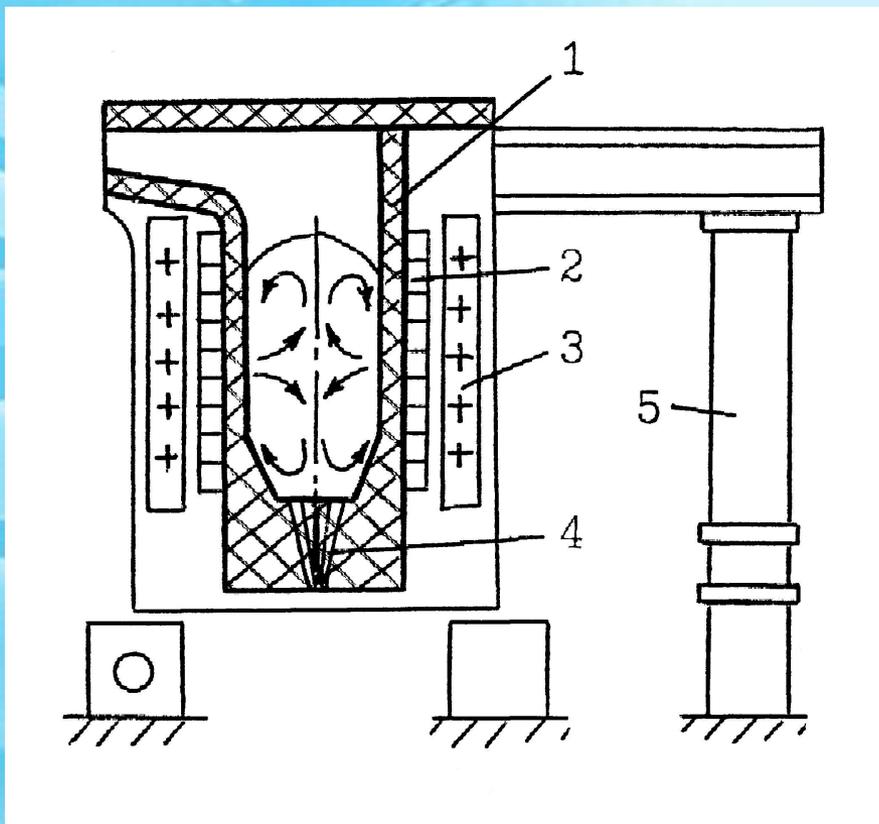
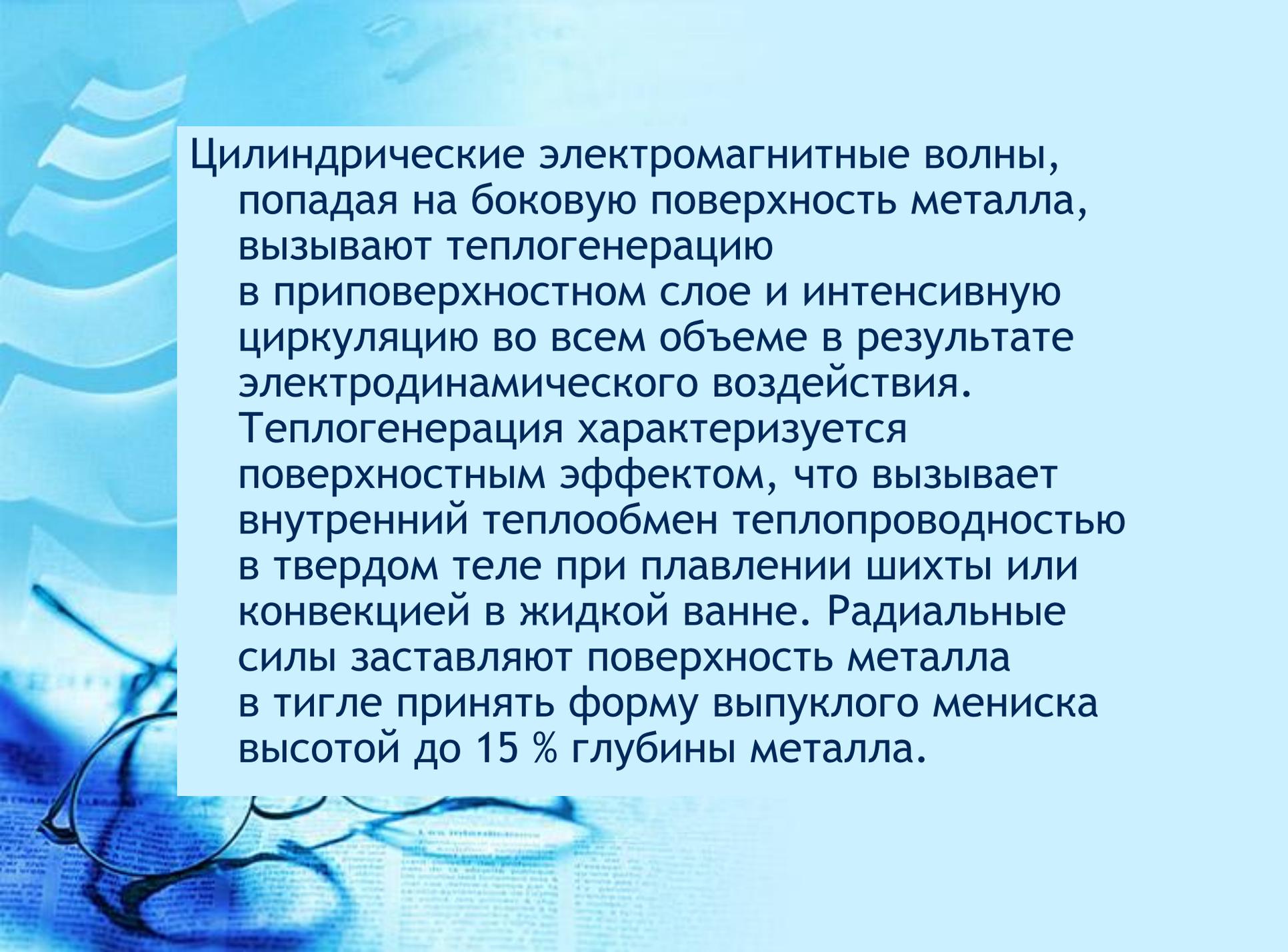


Схема тигельной
индукционной печи:
1 - тигель, 2 - индуктор,
3 - магнитопровод,
4 - сигнализатор состояния
футеровки, 5 - плунжер

Индуктор состоит из водоохлаждаемой медной трубки, витки которой изолированы стеклотканью с пропиткой кремнийорганическим лаком и последующим его спеканием. Вокруг индуктора установлены незамкнутые магнитопроводы в качестве магнитных экранов для защиты металлического корпуса печи от магнитного потока рассеяния во избежание нагрева.



Цилиндрические электромагнитные волны, попадая на боковую поверхность металла, вызывают теплогенерацию в приповерхностном слое и интенсивную циркуляцию во всем объеме в результате электродинамического воздействия. Теплогенерация характеризуется поверхностным эффектом, что вызывает внутренний теплообмен теплопроводностью в твердом теле при плавлении шихты или конвекцией в жидкой ванне. Радиальные силы заставляют поверхность металла в тигле принять форму выпуклого мениска высотой до 15 % глубины металла.

Чрезмерное перемешивание приводит к усилению окисления и газопоглощения металла, а выпуклый мениск затрудняет наведение шлака на зеркале ванны. Отрицательные электродинамические эффекты можно уменьшить понижением частоты тока, питающего индуктор. Однако работа на токах высокой частоты (~ 100 кГц) существенно удорожает электропечную установку.

Тигельные индукционные печи имеют низкий электрический к.п.д. 0,4-0,85 по сравнению с канальными, у которых он составляет 0,95-0,97. Электрический к.п.д. тигельных печей можно повысить применением тиглей из менее электропроводного металла.



Розлив металла из индукционной тигельной печи на заводе Уралхиммаш

*Индукционная тигельная печь ИАТ-6
НПЦ Магнитной гидродинамики
(г. Красноярск)*

Электронно-лучевые печи используют для переплавки и рафинирования W, Mo, Ta, Zr, Nb и U.

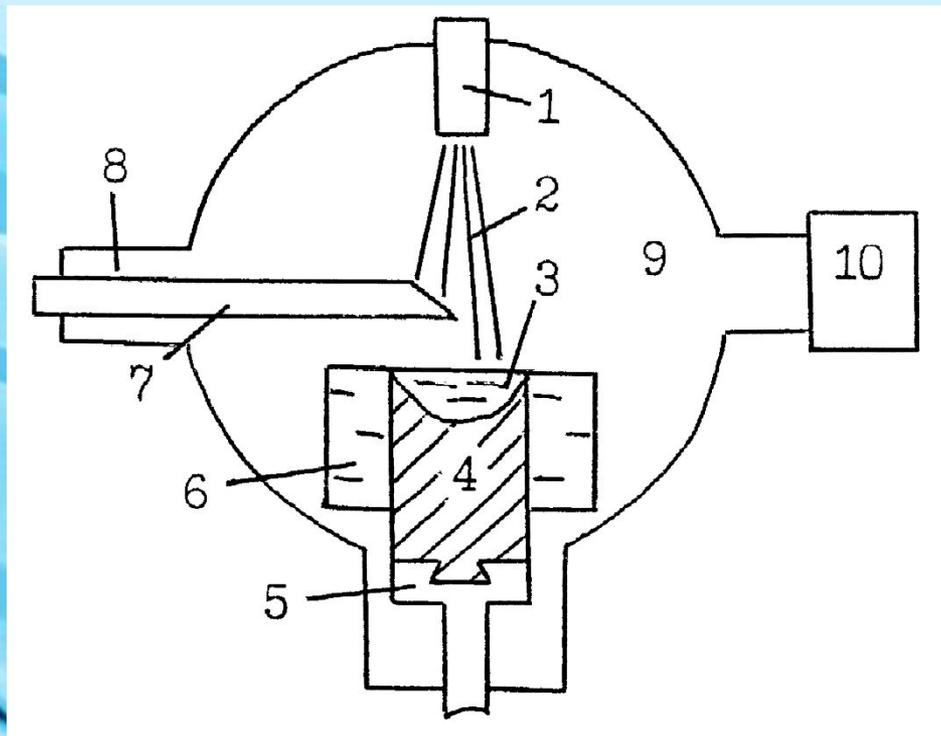


Схема электронно-лучевой печи:

1 - электронная пушка,
2 - электронный луч,
3 - жидкий металл,
4 - слиток, 5 - устройство для вытягивания слитка,
6 - кристаллизатор,
7 - переплавляемый материал, 8 - камера для подачи переплавляемого металла, 9 - рабочая камера, 10 - вакуум-насос

Наилучшими электронными пушками являются магнетронные, в которых электронный луч формируется магнитным полем. В них электростатическое поле не имеет решающего значения для ускорения электронов, но требуется точная юстировка катода и анода.

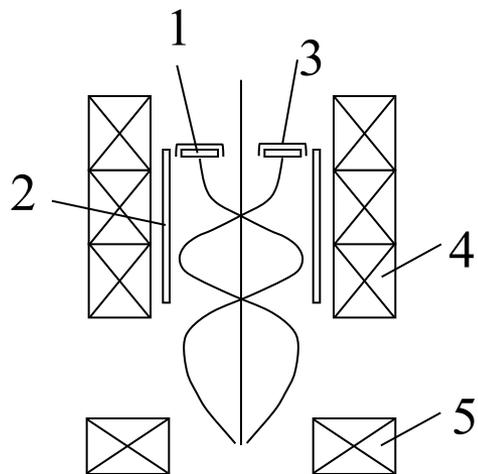


Схема магнетронной электронной пушки: 1 - катод, 2 - анод, 3 - фокусирующий электрод, 4 - магнитная катушка формирующей системы, 5 - магнитная катушка фокусировки

Электронный луч из электронной пушки подается на переплавляемый материал и на ванну жидкого металла, находящуюся в водоохлаждаемом кристаллизаторе, представляющем из себя кожух из нержавеющей стали с медной гильзой. Затвердевающий слиток на подвижном водоохлаждаемом поддоне - затравке вытягивают вниз по мере поступления расплава в кристаллизатор. Готовый слиток удаляют с помощью съемно-откатного механизма, смонтированного в нижней камере на подвижной платформе.

Из-за высокой температуры в таких печах через кристаллизатор отводится 40-75 % подводимой к металлу энергии. Тепловой к.п.д. печи составляет всего 15-20 %.

Для металлов с невысокой температурой плавления, например, Zr ($t_{\text{пл}} = 1825 \text{ }^\circ\text{C}$), наблюдается усиление величины теплового потока, отводимого от слитка через кристаллизатор при усилении мощности электронного луча, что объясняется увеличением глубины ванны и высоты пояса жидкого металла, прилегающего к стенкам кристаллизатора.

Для тугоплавких металлов - Mo ($t_{\text{пл}} = 2620 \text{ }^\circ\text{C}$) и W ($t_{\text{пл}} = 3410 \text{ }^\circ\text{C}$) - наблюдается обратное соотношение между величиной мощности, проходящей через выплавляемый слиток, и мощностью, подводимой к слитку.