



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО  
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. академика С. И. ВАВИЛОВА

М. С. ЛЕЙКАНД

**ВАКУУМНЫЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
ПЕЧИ**

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
1977

ЗАОЧНЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ  
ИТР

Редакционно-методический совет:

Глотов Н. И., Плисковский В. Я., Розанов Л. Н., Садилов Л. Г. (отв. за выпуск), Саксаганский Г. Л. (председатель), Цейтлин А. Б.  
Научный редактор — инж. Т. Н. Загорская.

**Лейканд М. С.** Вакуумные электрические печи. М., «Машиностроение», 1977, 52 с.

Настоящая брошюра содержит некоторые сведения о принципе устройства вакуумных электропечей (дуговых, плазменных, электронно-лучевых, ионных и индукционных). Подробнее описаны вакуумные электрические печи сопротивления, получившие наибольшее распространение в различных отраслях промышленности.

Приведены основные технические данные ряда выпускаемых в СССР вакуумных электропечей.

Брошюра — лекция рассчитана на ИТР, не связанных непосредственно с разработкой вакуумного электротермического оборудования, а применяющих это оборудование для конкретных технологических процессов.

Табл. 12, ил. 26, список лит. 16 назв.

## ВВЕДЕНИЕ

Вакуумные электропечи начали изготавливаться и получили распространение только в последние 20—30 лет в связи с возникновением таких новых отраслей промышленности как атомная, ракетная, электронная, а так же в связи со значительным качественным развитием черной и цветной металлургии, машиностроения, авиастроения и т. д.

Одним из важных преимуществ электронагрева в вакууме является возможность безокислительного нагрева металлов.

По сравнению с безокислительным нагревом в защитных средах нагрев при низком давлении печной среды исключает возможность взаимодействия нагреваемого металла с защитным газом (науглероживание, азотирование, насыщение газами и т. п.).

Во многих случаях применение низкого давления печной среды взамен защитных и особенно инертных (аргон, гелий) атмосфер экономически выгоднее. Увеличение первоначальных затрат на изготовление и установку вакуумных электропечей с избытком компенсируется снижением эксплуатационных расходов, связанных с приготвлением и очисткой защитного газа.

Плавка металлов в вакууме обеспечивает высокую степень очистки их от газов и окисных включений, исключает газовую пористость, позволяет обезуглеродить металл и очистить его от вредных примесей.

Применяемые при плавке низкие давления обеспечивают возможность создания электропечей с весьма высокой рабочей температурой нагревателей, вследствие отсутствия в вакууме окисления и насыщения газами.

В вакуумных электропечах можно проводить химико-термическую обработку — азотирование и цементацию, во много раз ускоряя процесс и получая высокое качество обрабатываемых изделий.

Вакуумный переплав металлов и сплавов разрешает значительно снизить содержание газов и количество неметаллических включений, обеспечить высокую однородность и плотность слитка за счет направленной кристаллизации жидкого металла, значительно улучшить физико-механические свойства металла [3, 15].

Преимущества электронагрева в вакууме определили весьма широкий круг технологических процессов, осуществляемых в вакуумных электропечах. К ним относятся: плавка высоколегирован-

ных, жаропрочных, тугоплавких металлов и сплавов; спекание изделий из легкоокисляющихся металлов; обезгаживание жидкого металла и различных материалов и изделий; широкий круг самых различных видов термической обработки, отпуск, отжиг, закалку; сушка различных материалов и изделий; пайка особо ответственных деталей и конструкций; дистилляция металлов, нанесение различных покрытий осаждением предварительно испаряемых материалов и т. д.

Наиболее широкое распространение получили вакуумные электропечи сопротивления, позволяющие получать рабочие температуры до  $2500^{\circ}\text{C}$ , при давлении до  $10^{-9}$  мм рт. ст. ( $\sim 10^{-7}$  Па). Объем рабочего пространства этих печей достигает десятков и сотен кубических метров.

Изучение материала лекций должно помочь инженерно-техническим работникам в определении целесообразности применения вакуумных печей для данного технологического процесса и в выборе вида или типа печи, наиболее соответствующего решению поставленной технологической задачи.

---

## ПРИНЦИПЫ УСТРОЙСТВА ОСНОВНЫХ ВИДОВ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

а) **Дуговые печи.** Вакуумные дуговые печи используются для выплавки качественных сталей — нержавеющей, конструкционных, шарикоподшипниковых, электротехнических; жаропрочных сплавов, тугоплавких и высокорекреакционных металлов (титана, циркония, молибдена, ниобия, тантала, вольфрама и др.).

Применение нашли два принципиально различных типа вакуумных дуговых печей: печи для плавки в охлаждаемый кристаллизатор (рис. 1), делящиеся в свою очередь на печи с глухим кристаллизатором и с вытягиванием слитка, и печи для плавки в гарнисаже (рис. 2).

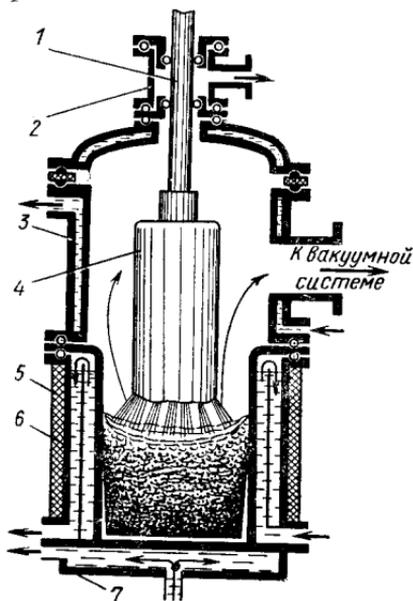


Рис. 1. Схема устройства дуговой вакуумной печи с расходным электродом для плавки в охлаждаемый кристаллизатор:

1—токоподводящий шток — электродо-держатель; 2—уплотнение штока; 3—вакуумная камера; 4—расходный электрод; 5—соленоид; 6—водоохлаждаемый кристаллизатор; 7—водоохлаждаемый поддон

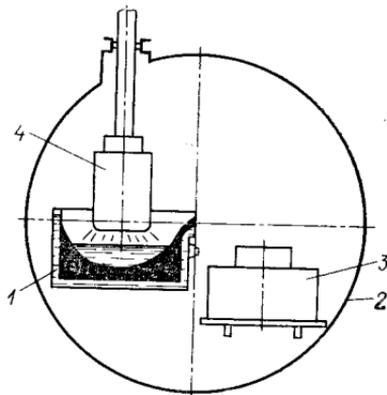


Рис. 2. Схема устройства дуговой вакуумной гарнисажной печи:

1—тигель; 2—вакуумная камера; 3—форма; 4—электрод

Кроме того, печи подразделяются на печи с нерасходуемым и расходуемым электродом.

В качестве материала электрода в дуговых вакуумных печах с нерасходуемым электродом могут быть использованы вольфрам или графит. Печи первого типа служат для плавки металла, постепенно засыпаемого в кристаллизатор из бункера. Из-за высокой температуры дуги материал электрода частично испаряется и загрязняет расплавляемый металл. Это обстоятельство резко ограничивает области применения электропечей с нерасходуемым электродом.

Значительно большее распространение получили дуговые вакуумные печи с расходуемым электродом, в которых материалом электрода служит выплаваемый металл. Расходуемым электродом может служить слиток, прокат или спеченная заготовка. Если требуется высокая чистота выплаваемого металла, выплавленный в вакуумной дуговой печи слиток используется как электрод и переплавляется вторично.

В вакуумных печах с расходуемым электродом в процессе плавки можно подавать в кристаллизатор из бункера шихту в виде порошка или кускового материала.

В дуговых вакуумных печах кристаллизатор выполняется в виде водоохлаждаемой трубы с заглушенным (глухой кристаллизатор) либо незаглушенным нижним торцом. При плавке в глухой кристаллизатор зона расположения жидкой ванны перемещается от дна кристаллизатора вверх. Поскольку длина выплаваемого слитков и соответственно кристаллизатора может составлять несколько метров, а зазор между кристаллизатором и электродом невелик, откачка выделяющихся при плавке газов затруднена, что отрицательно сказывается на качестве выплаваемого слитка.

Незаглушенный кристаллизатор имеет небольшую высоту, а плавка ведется с одновременным вытягиванием слитка вниз специальным механизмом. Условия для откачки газов из зоны плавления здесь много лучше.

Тогда как в дуговых вакуумных печах с кристаллизатором объем жидкого металла весьма невелик и непрерывно происходит его застывание и образование слитка, особенностью гарнисажных вакуумных дуговых печей является наличие водоохлаждаемого тигля, заполненного металлом. Стенки тигля покрыты коркой застывшего металла, отделяющего жидкий металл от стенок тигля. Благодаря этой корке (гарнисажу) выплаваемый металл не контактирует с материалом тигля и поэтому не загрязняется им. После наплавления необходимого количества металла его сливают в изложницу или форму.

В современных дуговых вакуумных печах выплавляют слитки весом в несколько десятков тонн и фасонные отливки весом в несколько сот килограммов.

Основные технические данные некоторых типов дуговых вакуумных электропечей приведены в табл. 1 и 2.

**б) Плазменные печи.** В электропечах этого вида в качестве

Таблица 1

Основные технические данные некоторых типов дуговых, вакуумных электропечей с плавкой в охлаждаемый кристаллизатор

Тип	Материал выплавляе- мых слитков	Диапазон диаметров выплавляе- мых слитков, мм	Максималь- ная длина слитка, мм	Максималь- ная масса слитка, т	Номиналь- ный ток, кА	Номиналь- ное напряжение, В	Максималь- ный расход охлаждаю- щей воды, м <sup>3</sup> /ч	Общая масса печи, т
ДСВ-3, 2-Г1 ДСВ-6, 3-Г6 ДСВ-8-Г16 ДСВ-11, 2-Г37 ДТВ-8, 7-Г10 ДДВ-1, 4-В0,1 ДКВ-3, 2ВГ 0,6	Сталь	160—320	1750	1,1	12,5	75	40	23
	Сталь	320—630	2700	6,3	25,0	75	70	29
	Сталь	560—820	4000	16	25,0	75	90	55
	Сталь	630—1120	5000	37	37,5	75	120	135
	Титан	560—870	4000	10,3	37,5	75	80	120
	Молибден	60—140	420	0,11	12,5	75	60	6,7
	Цирконий	200—250	1200	0,6	12,5	75	70	65

Таблица 2

Основные технические данные некоторых типов дуговых вакуумных гарнисажных электропечей

Тип	Выплавляемый металл	Максимальная емкость пла- вильной ванны, кг	Номинальный ток (постоян- ный), кА	Номинальное напряжение, В	Максимальные размеры линейной формы, м		Количество устанавливае- мых форм, шт.	Удельный рас- ход элекро- энергии, кВт·ч/кг	Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	Масса печи
					длина (диаметр)	ширина высота				
ДТВГ-0,06ПЦ ДТВГ-0,16ПФ ДТВГ-0,6ПЦ ДРВГ-0,025ПЦ	Титан	100	12,5	28—32	0,8	0,5	1	4	25	17,6
	Титан	160	14	28—33	0,8	0,5	5	1,7	38	36,6
	Титан	600	37,5	75	1,85	1,6	2	2,3	70	61,0
	Вольфрам	25	12,5	75	1,5	1,0	1	10	35	47,0

источника тепла используется низкотемпературная плазма, представляющая собой газ, разогретый до температуры заметной ионизации, причем количество положительно и отрицательно заряженных частиц в единице объема одинаково. Плазма вводится в печное пространство, где и осуществляется заданный технологический процесс нагревания. Образуется плазма с помощью плазмотрона (рис. 3), представляющего собой камеру с охлаждаемыми стенками, внутри которой расположен электрододержатель с катодом. Последний представляет собой стержень из тугоплавкого металла (вольфрама). Внутри камеры подается плазмообразующий газ, обычно аргон в смеси с азотом, водородом или другими газами, который, выходя через сопло ионизируется и становится источником тепловой энергии. Анодом в печи служит плавящийся металл.

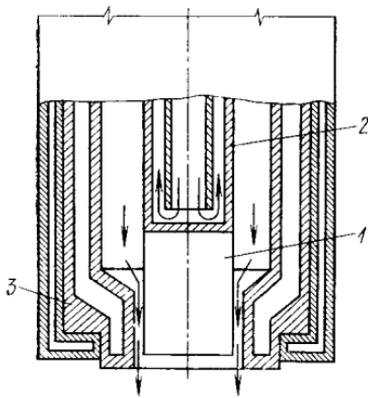


Рис. 3. Схема устройства плазмотрона постоянного тока:

1—вольфрамовый катод; 2—электрододержатель, в котором крепится катод; 3—охлаждаемое сопло

К числу вакуумных относятся только те плазменные печи, в которых во время рабочего процесса поддерживается низкое, значительно ниже атмосферного, давление газа [5].

Плазменные вакуумные печи используются для плавки стали, тугоплавких и высокорекреационных металлов. Схема устройства печи представлена на рис. 4. Технические данные печи типа ОКБ-1380 в табл. 3.

Таблица 3

Основные технические данные вакуумной плазменной электропечи ОКБ-1380, предназначенной для плавки кусковой шихты тугоплавких и высокорекреационных металлов

Наименование параметра		Величина
Мощность плазмотрона, кВт		150—220
Рабочий ток плазмотрона, А		1500—2000
Плазмообразующий газ		Аргон
Расход аргона, г/с		$(0,5—2) \cdot 10^{-2}$
Рабочий вакуум в электропечи, мм рт. ст. (Па)		$5 \cdot 10^{-3}$ ( $5 \cdot 10^{-1}$ )
Скорость вытягивания слитка, мм/мин		1—20
Расход охлаждающей воды м <sup>3</sup> /ч		20
Общая масса электропечи, т		20
Размеры выплавляемых слитков, мм	Диаметр	75—100
	Длина	800
Габаритные размеры печи, мм	Ширина	6000
	Длина	8400
	Высота	5500

**в) Электронно-лучевые печи.** В электронно-лучевых печах [6, 16] нагрев осуществляется благодаря бомбардировке поверхности нагреваемого предмета быстро движущимися электронами. Поскольку создать направленный поток электронов и сообщить ему достаточную энергию можно эффективно только в условиях высокого вакуума, в электронно-лучевых печах поддерживается весьма низкое давление, достигающее до  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  мм рт. ст. ( $\sim 10^{-3}$ — $10^{-4}$  Па).

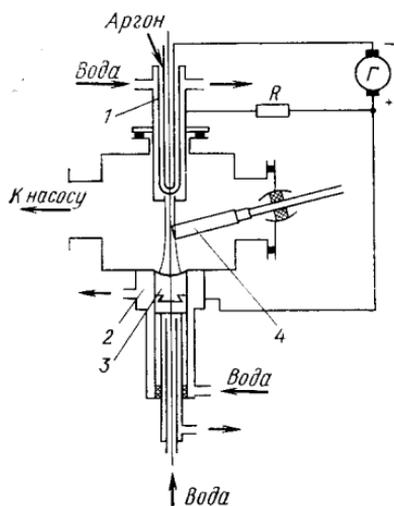


Рис. 4. Схема устройства плазменной вакуумной печи для плавки в кристаллизаторе с вытягиванием слитка:

1—плазматрон; 2—кристаллизатор;  
3—расплавленный металл (анод);  
4—переплавляемый электрод

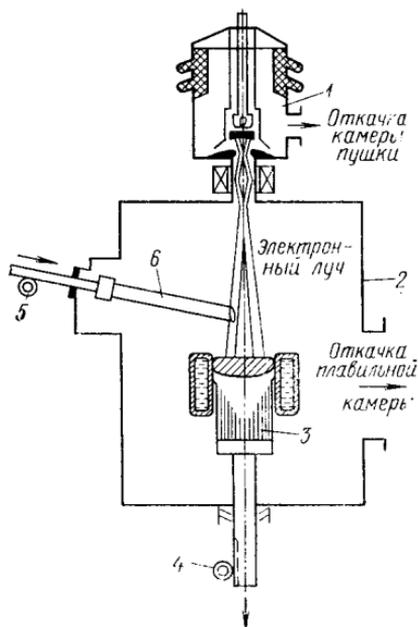


Рис. 5. Схема плавильной электронно-лучевой печи с аксиальной электронной пушкой:

1—пушка; 2—плавильная камера; 3—кристаллизатор; 4—механизм вытягивания слитка; 5—механизм подачи переплавляемого электрода; 6—переплавляемый электрод

Электронно-лучевые печи применяются тогда, когда требуется получение особо чистых металлов. В печах этого вида плавят тугоплавкие и высокорреакционные металлы: вольфрам, молибден, тантал, ниобий, бериллий, цирконий и другие, так же качественные, жаропрочные стали и многие цветные металлы.

Электронно-лучевые печи используются не только для плавки, но и для различных процессов, связанных с нагревом материалов, например при выращивании и зонной очистке монокристаллов, термической обработке ленты, испарении металлов с целью нанесения покрытий, для сварки и т. д.

Преимуществом электронно-лучевых печей является высокая чистота процесса нагрева, возможность большой концентрации

мощности (до 1000 кВт/см<sup>2</sup>) и соответственно значительного перегрева металла, что обеспечивает удаление примесей, имеющих более высокую упругость пара, чем основной металл.

Основным элементом электронно-лучевой печи является нагревательный элемент или пушка. В зависимости от способа генерации и формирования электронного пучка пушки могут иметь различные модификации. На рис. 5 изображена схема плавильной электронно-лучевой печи с аксиальной электронной пушкой, на рис. 6 — вариант конструкции пушки, принцип работы которой состоит в следующем: разогретая накальным током вольфрамовая спираль излучением и бомбардировкой электронами разогревает массивный катод до температуры ~2800°С (между спиралью и катодом создается разность потенциалов 3—5 кВ).

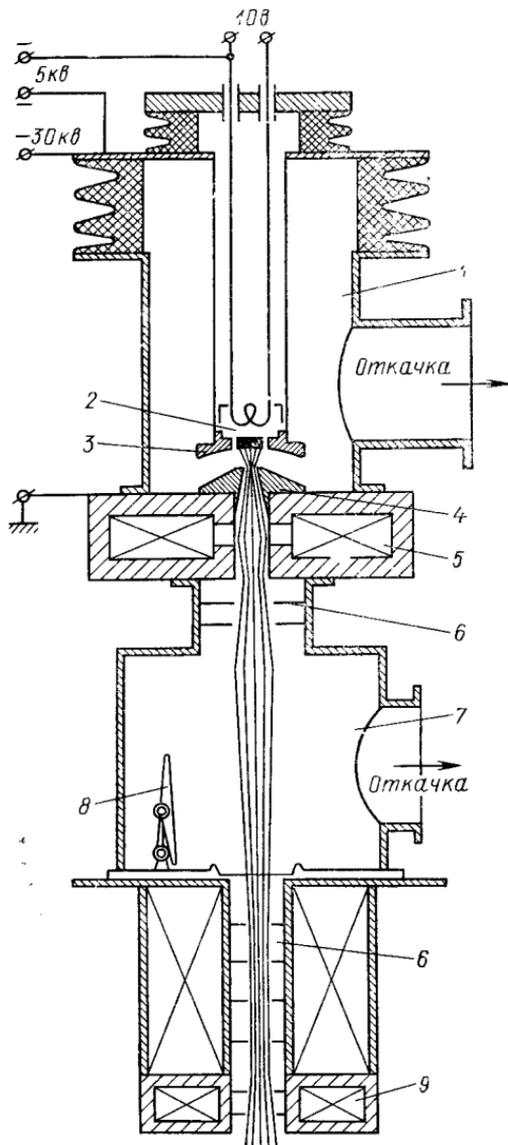


Рис. 6. Вариант устройства аксиальной электронной пушки:

1—верхняя камера; 2—катод; 3—прикатодный электрод; 4—анод; 5—верхняя магнитная линза; 6—система диафрагм; 7—нижняя камера; 8—вакуумный затвор; 9—нижняя магнитная линза

Система, состоящая из прикатодного электрода, анода с отверстием и электромагнитных фокусирующих устройств формирует пучок электронов и выводит его в рабочую камеру печи, направляя на нагреваемый объект. Благодаря двухступенчатой вакуумной системе, заключающейся в независимой откачке камер 1 и 7 давление в первой (где расположен катод) поддерживается около  $1,10^{-5}$  мм рт. ст. ( $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па).

Насосы, откачивающие камеру 7, эвакуируют основное количество газов, натекающих в пушку из рабочей камеры, а диафрагмы, установленные между камерами 1 и 7 и между камерой 7 и рабочей камерой, снижают количество натекающих в камеру 2 газов.

Наряду с магнитными линзами 5 и 9, фокусирующими луч, пушка снабжена системой развертки луча 10. Благодаря

Основные технические данные некоторых типов электронно-лучевых плавильных печей

Тип	Мощность, кВт	Количество электронных пушек, шт.	Быстрота откачки основных насосов, ДМ <sup>3</sup> /с	Данные выплавляемого слитка			Расход охлаждающей воды, М <sup>3</sup> /ч	Масса печи, т	Назначение печи
				диаметр мм	длина, мм	масса, кг			
ЭЛП-50	50	1	8000	30—50	150	3		Лабораторная выплавка слитков и плоских образцов особо чистых металлов	
ЭСП-125	150	1	40000	160	1500	235	20	Выплавка слитков прецизионных сталей	
ЭДП-250	250	1	20000	100—160	600	120	28	Выплавка слитков тугоплавких металлов типа молибдена	
ЭДП-500	500	2	80000	160—280	1500	900	43,5	То же	
ЭРП-1000	1000	2	80000	160—280	1500	1800	108	Выплавка слитков вольфрама, рения, тантала и их сплавов	
ЭСП-1000	1000	4	200000	350—500	3000	4500	181	Выплавка стальных слитков	

Основные технические данные электронно-лучевых печей для термической обработки ленты

Тип	Мощность, кВт	Количество электронных пушек, шт.	Быстрота откачки основных насосов, ДМ <sup>3</sup> /с	Сечение обрабатываемой ленты, мм	Рабочий вакуум, мм рт. ст. (Па)	Скорость движения обрабатываемой ленты, м/мин	Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	Неравномерность температуры нагрева, °С	Масса печи, т
ЭСТ-150	150	1	8000	0,05—0,35 × ×125	5·10 <sup>-4</sup> —1·10 <sup>-5</sup> (5·10 <sup>-2</sup> —1·10 <sup>-3</sup> )	0,1—10	10	±2	
ЭСТ-300	300	2	40000	0,02—0,15 × ×125	5·10 <sup>-4</sup> —1·10 <sup>-5</sup> (5·10 <sup>-2</sup> —1·10 <sup>-3</sup> )	1—30	15	±2	20,4

им достигается возможность получить пятно диаметром 5—10 мм на расстоянии 1,5—2 м от катода и перемещать его по поверхности слитка. В табл. 4 и 5 приведены основные технические данные некоторых типов электронно-лучевых печей.

г) **Электропечи с ионным нагревом.** В электропечах этого типа нагрев осуществляется путем бомбардировки нагреваемого предмета ионизированными газами или парами [1]. Обычно нагрев ионной бомбардировкой производится тогда, когда наряду с процессом нагрева необходимо обеспечить химическое взаимодействие поверхности нагреваемого предмета с бомбардирующим веществом. В настоящее время ионный нагрев получил распространение в печах для нанесения покрытий, упрочняющих, повышающих износостойкость или коррозионную стойкость (процессы азотирования, покрытия поверхности различными металлами, нитридами, и др.). Принцип устройства печей с ионным нагревом состоит в ионизации подаваемых в печь газов или паров напыляемого материала с помощью электрического или магнитного поля, разгоняющего и направляющего эти ионы на поверхность обрабатываемой детали.

Таблица 6

Основные технические данные электропечей ионного азотирования

Наименование параметра	Типы печи	
	ОКБ-1566	НГВ6.6/6
Номинальная мощность, кВт	170	67
Напряжение питающей сети, В	380/220	380/220
Число фаз	3	3
Частота, пер/с	50	50
Максимальное напряжение горения разряда, В	1000	1400
Максимальный ток разряда, А	120	35
Номинальная температура азотируемых деталей, °С	600	600
Давление в печи, мм рт. ст. (Па)	10—5 · 10 <sup>-2</sup> (100—5)	10—5 · 10 <sup>-2</sup> (100—5)
Наибольший расход рабочего газа, м <sup>3</sup> /ч	0,1	0,05
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	7	5
Размеры рабочего пространства, мм		
а) диаметр	960	600
б) высота	1200	600
Масса садки, кг	300	50
Время азотирования	4—24 ч (в зависимости от слоя)	4—24 ч от толщины

Преимущества этого вида печей состоят в значительном ускорении протекающих процессов и повышении качества наносимых покрытий.

На рис. 7 приведена схема устройства электропечи для азотирования деталей методом ионной бомбардировки, а в табл. 6 основные технические данные двух типов этих печей.

д) **Индукционные печи.** Индукционные вакуумные печи получили довольно широкое распространение для самых различных технологических процессов, что определило и большое разнообразие имеющихся типов и конструкций [7].

В подавляющем большинстве индукционные вакуумные печи применяются для плавки и разливки различных металлов и сплавов, причем наибольшее распространение получили плавильные печи с наклоняемым тиглем внутри стационарного кожуха. Служат они, в основном, для плавки и разливки в изложницы различных марок качественных, высоколегированных сталей.

В крупном металлургическом производстве обычно применяются печи полунепрерывного действия, в которых загрузка шихты в тигель, а также эвакуация слитков из печи производится шлюзованием, без нарушения вакуума в плавильной камере.

Там, где объем производства и массы слитков невелики или печи используются для получения фасонного литья, обычно применяют печи периодического действия, в которых каждый новый процесс плавки связан с вскрытием плавильной камеры для удаления готовых отливок, чистки и загрузки тигля.

На рис. 8 приведена схема устройства индукционной плавильной печи полунепрерывного действия с неподвижным кожухом и поворотным тиглем. Основными элементами конструкции являются: плавильная камера, внутри которой расположен индуктор с плавильным тиглем; шлюзовая камера для ввода в печь и эвакуации из печи изложниц (или форм); шлюзовая камера для ввода в печь шихты; дозатор для внесения в расплав легирующих присадок; комплекс устройств, связанных с пробивкой мостов, замером температуры в расплаве, взятием проб металла, скачиванием шлака, зачисткой тигля после слива металла и т. д. В табл. 7 приведены основные технические данные некоторых типов индукционных сталеплавильных печей периодического и полунепрерывного действия.

Иногда, особенно в металлургии некоторых редких металлов, применяются индукционные плавильные печи с донным разливом металла (рис. 9). В этих печах тигель и изложница неподвижны в течение всего времени разливки.

Конструктивные схемы различных печей с донным разливом в основном аналогичны: внутри герметичного кожуха помещены индуктор и тигель, под тиглем изложница. В дне тигля имеется отверстие, закрытое пробкой. По окончании плавки отверстие в дне тигля освобождается от пробки, и металл сливается в изложницу.

Печи с донным разливом разрешают повысить качество литья, предохраняя отливку от попадания неметаллических включений,

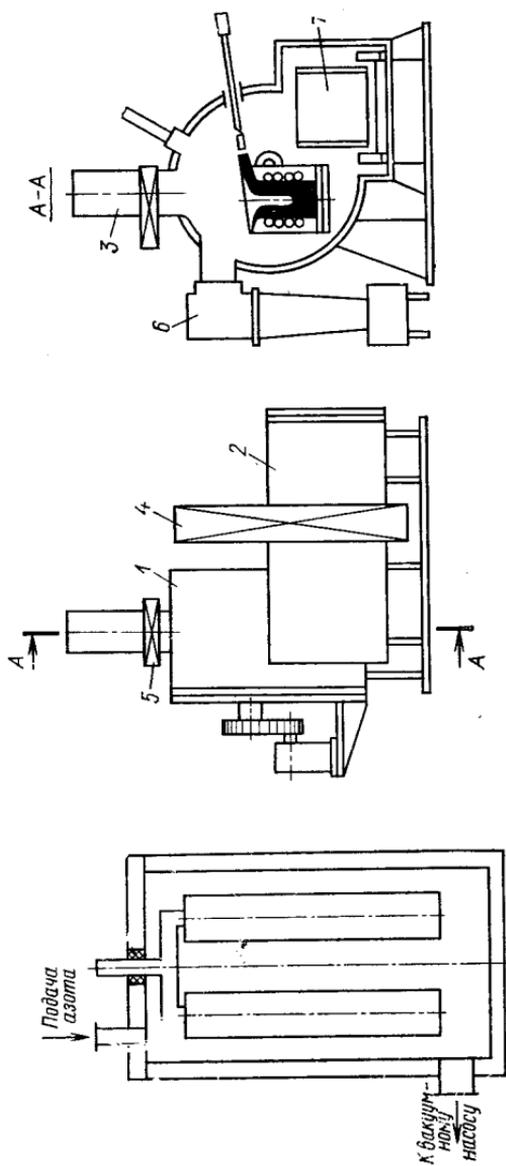


Рис. 7. Схема устройства  
электропечи ионного азоти-  
рования

Рис. 8. Схема устройства индукционной плавильной печи полу-  
непрерывного действия с неподвижным кожухом и наклоняющим-  
ся тиглем:

1—кожух печи; 2—шлюзовая камера для форм; 3—шлюзовая камера для  
шихты; 4, 5—технологические вакуумные затворы; 6—откатной агрегат;  
7—литейная форма

## Основные технические данные некоторых типов индукционных вакуумных сталеплавильных электродов

Тип	Установлен- ная мощность, кВт	Номинальная емкость, кГ	Рабочий вакуум, мм рт. ст. (Па)	Максимальная температура расплава, °С	Данные питающего гене- ратора			Общая масса печи, т	Примечание
					мощ- ность, кВт	напря- жение, В	частота, Гц		
ИСВ-0,004-ПК-М1	52	4	10 <sup>-5</sup> (10 <sup>-3</sup> )	2000	30	200	8000	5,0	Лабораторная
ИСВ-0,01-ПИ-М2	110	10	10 <sup>-4</sup> (10 <sup>-2</sup> )	1700	50	400	2400	7,5	Периодического дей- ствия для слитков
ИСВ-0,01-ПФ-М1	175	10	5·10 <sup>-3</sup> (5·10 <sup>-1</sup> )	1600	100	400	2400	8,4	Периодического дей- ствия для фасонного литья
ИСВ-0,025-ПФ-М1	175	25	5·10 <sup>-3</sup> (5·10 <sup>-1</sup> )	1650	100	400	2400	8,4	То же
ИСВ-0,06-ПИ-М3	109	60	5·10 <sup>-3</sup> (5·10 <sup>-1</sup> )	1800	50	400	2400	7,0	Периодического дей- ствия для слитков
ИСВ-0,16-ПИ-М3	157	160	5·10 <sup>-3</sup> (5·10 <sup>-1</sup> )	1800	100	400	2400	7,5	То же
ИСВ-0,16-НИ-М1	330	160	5·10 <sup>-3</sup> (5·10 <sup>-1</sup> )	1700	2×100	800	2400	35,2	Полупрерывного действия для слитков
ИСВ-0,6-НИ-М3	1300	600	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-1</sup> )	1700	500	750	1100	96,6	То же
ИСВ-1-НИ-М1	2640	1000	10 <sup>-3</sup>	1800	1000	1000	1000	162	»
ИСВ-2,5-НИ-М1	4200	2500	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-1</sup> )	1800	1500	1000	1000	162	»

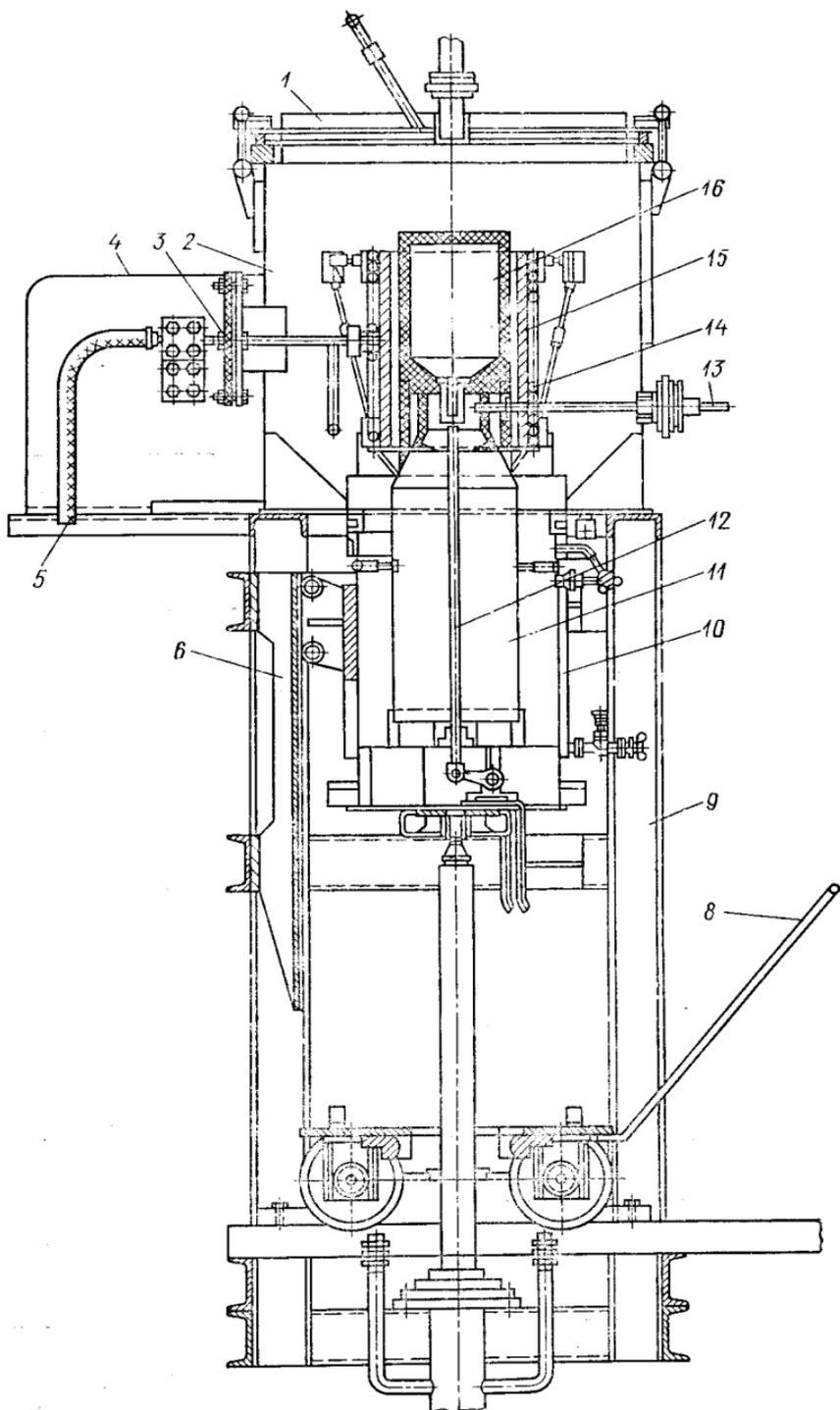


Рис. 9. Вакуумная индукционная плавильная печь с донным разливом металла:

1—крышка; 2—кожух печи; 3—вывод индуктора; 4—кожух выводов; 5—водоподводящий шланг; 6—направляющие поддона; 7—плунжер для подъема и опускания поддона с изложницей; 8—тележка для транспортирования поддона; 9—опора; 10—поддон; 11—изложница; 12—штанга для выдерживания стопора (при стопорном варианте разливки); 13—боек (при разливки путем обламывания пробки); 14—индуктор; 15—теплоизоляция; 16—тигель

т. к. последние в процессе плавки всплывают на поверхность расплавленного металла.

Помещение индуктора в вакуумное пространство при плавке некоторых металлов может стать источником серьезных аварий, связанных с возможным появлением течи в индукторе и попаданием воды в расплав.

Индукционные печи применяют в тех случаях, когда индуктор выносится из плавильного пространства и располагается вне кожуха печи (рис. 10). Кожух в этих печах изготавливается из термостойкого вакуумплотного электроизоляционного немагнитного материала, например, кварца. Схема конструкции печи состоит в следующем. Кварцевая труба уплотняется с помощью двух стальных крышек, крепящихся на торцах трубы, в крышках сделаны отверстия для откачки печи, загрузки, установки необходимого для ведения плавки и контроля за плавкой инструмента и измерительных приборов. Концентрично кварцевой трубе вне ее устанавливается индуктор. Внутри трубы на уровне индуктора устанавливается тигель. Теплоизоляция тигля от кварцевой трубы осуществляется керамическими либо металлическими экранами, причем последние делаются, как правило, разрезными.

Неправильная форма кварцевой трубы (особенно большого диаметра) приводит к большому зазору между индуктором и загрузкой, что сильно снижает к. п. д. печи. В этих печах слив металла обычно донный.

Нагревательные индукционные вакуумные печи за счет возможности применения высоких удельных мощностей разрешают производить ускоренный нагрев до высокой температуры, ограничиваемой только стойкостью тепловой изоляции (в этих печах применения жароупорных сплавов или тугоплавких металлов можно избежать).

На практике нашли применение индукционные вакуумные печи прямого и косвенного нагрева. Принцип работы первых заключается в том, что в них токи индуктируются непосредственно в нагреваемой садке; вторые имеют вспомогательный нагреватель, обычно из тугоплавкого металла или графита, представляющий собой цилиндр, установленный концентрично индуктору. Внутри этого цилиндра помещается садка. Токи индуктируются в этом цилиндре — нагревателе и разогревают его. Садка же нагревается излучением от этого вспомогательного нагревателя.

Такая схема разрешает нагревать в индукционной печи садки любой конфигурации с любыми физическими параметрами. В табл. 8 приведены основные технические данные этих печей.

**е) Печи сопротивления.** Этот вид печей является наиболее универсальным, имеет много областей применения и поэтому получил наибольшее распространение. Вакуумные электропечи сопротивления весьма разнообразны по режиму работы, типу и параметрам [4, 9].

По режиму работы печи можно разделить на:

периодического действия, в которых одновременно осуществля-

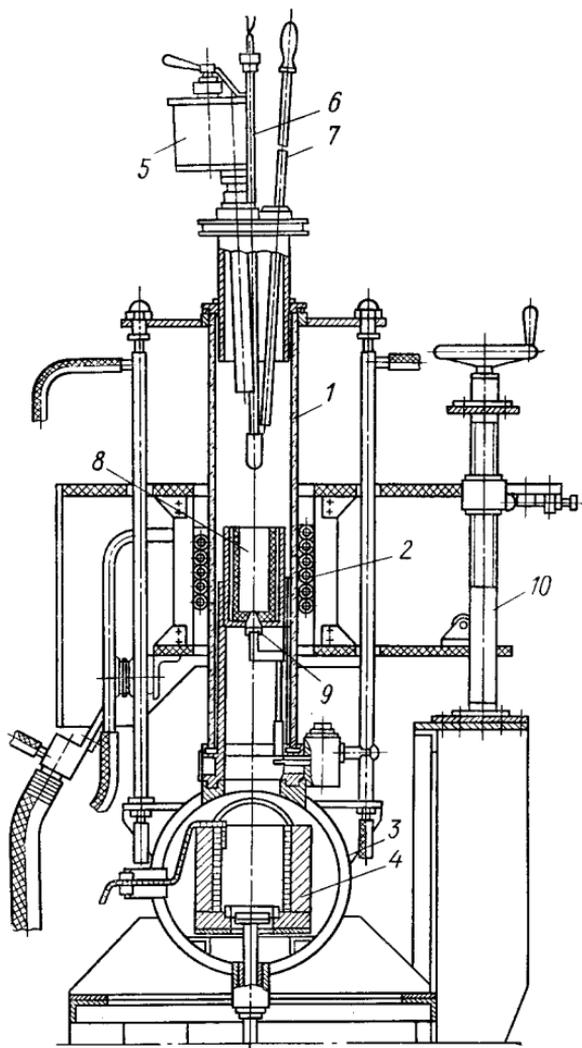


Рис. 10. Индукционная вакуумная плавильная электропечь с индуктором, расположенным вне плавильного пространства:

1—кварцевая труба; 2—индуктор; 3—камера для изложницы; 4—подогрев изложницы; 5—дозатор; 6—термопара погружения; 7—ломик; 8—тигель; 9—пробка сливного отверстия тигля; 10—механизм перемещения индуктора

Основные технические данные некоторых типов индукционных вакуумных термических печей

Тип	Установленная мощность, кВт	Максимальная рабочая температура, °С	Рабочий вакуум, мм рт. ст. (Па)	Размеры рабочего пространства		Данные питающего генератора			Масса печи, т	Примечание
				Диаметр, мм	Высота, мм	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота, Гц		
ИШВ-2,5 · 6/21	170	2100	200—300 (2...3) · 10 <sup>4</sup>	250	600	100	400	2400	4,5	Назначение: силицирование графита, обжиг, спекание
ИШВ-4,5 · 6/21	370	2100	10—20 (1...2) · 10 <sup>2</sup>	450	600	250	750	2500	7,3	То же
ИШВ-5,5 · 6/21	730	2100	200—300 (2...3) · 10 <sup>4</sup>	550	600	500	750	2500	»	»
ИШВ-5,5 · 8/22-К	652	2200	3—5 (3...5) · 10 <sup>2</sup>	550	800	500	750	2500	8,5	Назначение: нанесение покрытий и насыщение пористых материалов диффузией из газовой среды
ИШВ-7,5 · 20/12-К	377	1200	3—5 (3...5) · 10 <sup>2</sup>	750	2000	250	750	2500	12,8	То же

ется один и тот же режим нагрева или охлаждения для всей находящейся в нагревательной камере садки. Процесс загрузки и выгрузки садки связан с повышением давления в нагревательной камере до атмосферного;

полунепрерывного действия, в который загрузка и выгрузка садки осуществляются без нарушения вакуума в нагревательной камере, а режим нагрева аналогичен периодическому;

непрерывного действия, в которых загрузка и выгрузка садки осуществляются либо непрерывно, либо порциями без нарушения вакуума в нагревательной камере, садка постоянно перемещается от загрузочной к разгрузочной стороне, а режим нагрева садки в данный момент зависит от занимаемого ею места в нагревательной камере.

В зависимости от конкретных условий производства, характера нагрева садки и осуществляемого технологического процесса печи периодического и полунепрерывного действия могут выполняться камерными, шахтными, элеваторными, колпаковыми и др. Печи непрерывного действия — толкательными, тоннельными, с шагающим подом, протяжными. В последнее время ведутся работы над созданием конвейерных, рольганговых и печей других типов. Однако печи каждого из перечисленных типов в зависимости от условий проведения технологического процесса могут иметь самые различные модификации. Рабочая температура вакуумных электропечей сопротивления достигает  $2500\text{--}3000^\circ\text{C}$ , рабочий вакуум  $10^{-8}$  —  $10^{-9}$  мм рт. ст. ( $\sim 10^{-6}$ ...  $10^{-7}$  Па).

Принцип устройства вакуумных электропечей сопротивления заключается в наличии герметичной теплоизолированной камеры, внутри которой расположены нагревательные элементы, выделяющие тепло за счет протекания по ним электрического тока.

Поскольку электрические печи сопротивления получили очень большое распространение, применяются для самых разнообразных технологических процессов, вопросы их конструкции рассматриваются здесь более подробно.

## НЕКОТОРЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВАКУУМНЫМ ПЕЧАМ

а) **Герметичность.** В отличие от многих вакуумных аппаратов, где основной характеристикой является поддерживаемое в них давление, в вакуумных печах наряду с этим фактором весьма важным является минимальное натекание газов в печь. Дело в том, что в условиях высокой температуры натекающие в печь газы химически взаимодействуют с садкой, снижая ее качество, и элементами конструкции печи, выводя их преждевременно из строя. Таким образом, даже наличие мощной откачной системы, способной поддержать низкое давление, не обеспечит нормальной работы печи, если натекание воздуха будет большим. Поэтому перед пуском в эксплуатацию печь должна быть тщательно обезгажена и, если величина натекания при этом остается большой,

проверена галоидным или гелиевым течеискателем. Все обнаруженные течи должны быть устранены.

Материалы и устройство отдельных узлов и деталей печи должны быть такими, чтобы величина натекания газов в печь была минимальной и чтобы имелась постоянная возможность проверки герметичности и обнаружения места течи.

Основным узлом вакуумной печи, обеспечивающим ее герметичность, является кожух. Поскольку кожухи вакуумных печей представляют собой сложные конструктивные узлы с большим числом и протяженностью сварных швов, чаще всего двойными стенками, тяжелыми тепловыми условиями работы из-за наличия температурных градиентов, обеспечить герметичность кожуха бывает довольно сложно.

Кожухи вакуумных печей в подавляющем большинстве случаев водоохлаждаемые, имеют цилиндрическую форму, наиболее совершенную с точки зрения прочности, упрощающую механическую обработку фланцев и требующую минимального числа сварных швов.

**б) Взрывозащищенность.** При нормальной эксплуатации вакуумных электропечей они взрывобезопасны. Вместе с тем известны ситуации, приводившие к быстрому нарастанию давления в печи, а иногда и к взрыву.

В числе причин нарастания давления — попадание воды или масла в разогретое рабочее пространство печи. Вода может попасть в печь при повреждении сварного шва полости водяного охлаждения, масло — при остановке ротационного масляного насоса, если при этом не перекрыт вакуум-провод насос — печь.

Для стравливания избыточного давления из вакуумной печи применяются предохранительные клапаны. Главное требование к этим клапанам — обеспечить стравливание избыточного давления, не допуская попадания внешнего воздуха в печь.

Взрыв в вакуумных печах связан, главным образом, с характером технологического процесса и обрабатываемых материалов. Например, при попадании воды в печь с нагретым титаном, в результате их взаимодействия может образоваться свободный водород, и, если в это время печь разгерметизируется, возможно образование гремучего газа и взрыв.

Попадание воздуха в печь может привести к взрыву, если садка при нагреве дает возгоны, конденсирующиеся на холодных поверхностях печи (магний, натрий и др.) в виде мелкодисперсного порошка, бурно взаимодействующего с воздухом.

**в) Электрическая прочность изоляции.** В рабочем объеме вакуумной электропечи всегда имеются токоведущие детали, находящиеся под электрическим потенциалом, электрическая изоляция которых затруднена (нагревательные элементы, токоподводы и др.) и поэтому имеется возможность возникновения электрического разряда. Разность потенциалов, при котором возникает разряд (напряжение затягивания  $U_3$ ) зависит от давления среды  $p$ , расстояния  $d$  между находящимися под напряжением деталями и

определяется кривой Пашена  $U_3=f(pd)$ , имеющей при комнатной температуре минимум при давлении  $p \cong 1$  мм рт. ст. ( $\sim 100$  Па) с ростом температуры минимум смещается в сторону более высоких давлений. При этом  $U_3$  уменьшается по абсолютной величине, вследствие увеличения электронной эмиссии с находящихся под напряжением деталей и повышения степени ионизации среды.

При выборе напряжения питания вакуумной печи следует иметь в виду, что даже если печь предназначена для работы под высоким вакуумом, когда электрическая прочность среды велика, не исключается возможность кратковременного повышения давления в печи из-за интенсивного газовыделения из садки, ухудшения работы насосов, появления течи и т. д. Поэтому желательно выбрать величины  $U_3$  вести по минимальному ее значению. Обычно в вакуумных печах сопротивления питающее напряжение не превосходит 100—120 В.

г) **Вакуумная гигиена.** Для удовлетворительной работы печи в части ее надежности, поддержания требуемого вакуума и получения высокого качества обрабатываемой садки необходимо соблюдение условий вакуумной гигиены. Условия соблюдения вакуумной гигиены включают в себя требования к устройству и содержанию помещений, к содержанию элементов конструкции вакуумных печей, к обслуживающему эти печи персоналу.

Объем требований вакуумной гигиены зависит от типа электропечи, ее предельного вакуума, технологического процесса, осуществляемого в печи.

Определение соответствия помещения требованиям вакуумной гигиены сводится к решению вопроса, не будет ли садка загрязняться перед ее загрузкой в печь или после ее выгрузки из печи с учетом условий ее складирования, транспортирования и проведения подготовительных операций перед осуществлением электронагрева. Садка, загружаемая в печь, должна быть очищена от грязи, смазочных материалов и тщательно просушена. Поэтому содержание помещения должно исключать возможность выделения загрязняющих веществ и влаги.

Низко- и средневакуумные электропечи (с давлением до 10 мм рт. ст. ( $\sim 10^{-1}$  Па) могут устанавливаться в обычных цехах металлургических и машиностроительных заводов, температура в которых не падает ниже  $+5^\circ\text{C}$ , оборудованных приточно-вытяжной вентиляцией. Рядом с печами не должно находиться оборудование, работа которого связана со значительным тепловым излучением, пыле- и дымо- образованием.

Электропечи высоковакуумные и сверхвысоковакуумные могут устанавливаться только в чистых, сухих, хорошо вентилируемых помещениях. Полы, потолки и стены этих помещений должны быть покрыты материалами, не позволяющими скапливаться в помещении пыли и мусору и легко доступными для уборки.

Газы, выбрасываемые из выхлопных патрубков форвакуумных насосов, должны с помощью трубопроводов выводиться за пределы помещения, где установлена печь. Помещения необходимо

убирать регулярно, обеспечивая минимальное загрязнение атмосферы помещения пылью (пылесосами, влажной протиркой и т. д.) и желательно в то время, когда печь полностью закрыта и находится под вакуумом.

Соблюдение правил вакуумной гигиены при работе вакуумных электропечей [7, 9] во многом зависит от степени подготовки обслуживающего персонала. Персонал, обслуживающий электропечь, должен постоянно иметь чистую спецодежду, а при работе с высоковакуумными и сверхвысоковакуумными печами — белые чистые халаты и головные уборы. Перед началом и в процессе производства работ необходимо следить за чистотой рук, работы производить чистым обезжиренным инструментом, не вносить в электропечь на обуви и одежде грязь, пыль, влагу и др.

Надо постоянно помнить, что причиной большинства случаев неудовлетворительной работы вакуумных электропечей является нарушение правил вакуумной гигиены.

## МАТЕРИАЛЫ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Из технических требований, предъявляемых к материалам, работающим в вакууме, особое значение в вакуумном электропечестроении имеют: малые упругости пара и соответственно малая скорость испарения при рабочих температурах; температуры диссоциации окислов карбидов и других химических соединений, из которых изготовлены работающие в нагревательной камере детали, должны быть выше их рабочей температуры; отсутствие химических реакций взаимодействия работающих в печи материалов, особенно протекающих с обильным газовыделением.

На рис. 11, а приведен график зависимости упругости пара, а на рис. 11, б скорости испарения от температуры для некоторых применяемых или обрабатываемых в вакуумных печах материалов.

В качестве материалов для нагревателей, горячих токоподводов, теплоизоляционных экранов, подставок, подвесок, опор и других деталей, работающих при высоких температурах в вакуумных электропечах, в зависимости от условий работы применяются хромоникелевые, железо-хром-алюминиевые сплавы, тугоплавкие металлы, графит [4, 10, 11].

Испытания конструкционных сталей марок 2X13, X18N10T, X25N18 и сплавов сопротивления X20N80, X15N60103A, OX23105A, OX27105A показали, что при высокой температуре и вакууме они заметно испаряются и при температурах выше 950...1000°С скорость испарения достигает 50...60 г/м<sup>2</sup> за 100 ч.

Наиболее часто применяемые в электропечестроении тугоплавкие металлы — молибден и вольфрам, реже тантал.

Максимальные температуры применения в вакууме вольфрама составляют 2500°С, тантала — 2200°С, молибдена — 1700°С. При более высоких температурах их механическая прочность резко падает, а скорость испарения становится недопустимо большой.

Эти металлы имеют высокий температурный коэффициент сопротивления, из-за чего питание нагревателей должно осуществляться от источников, разрешающих постепенное повышение напряжения при разогреве печи.

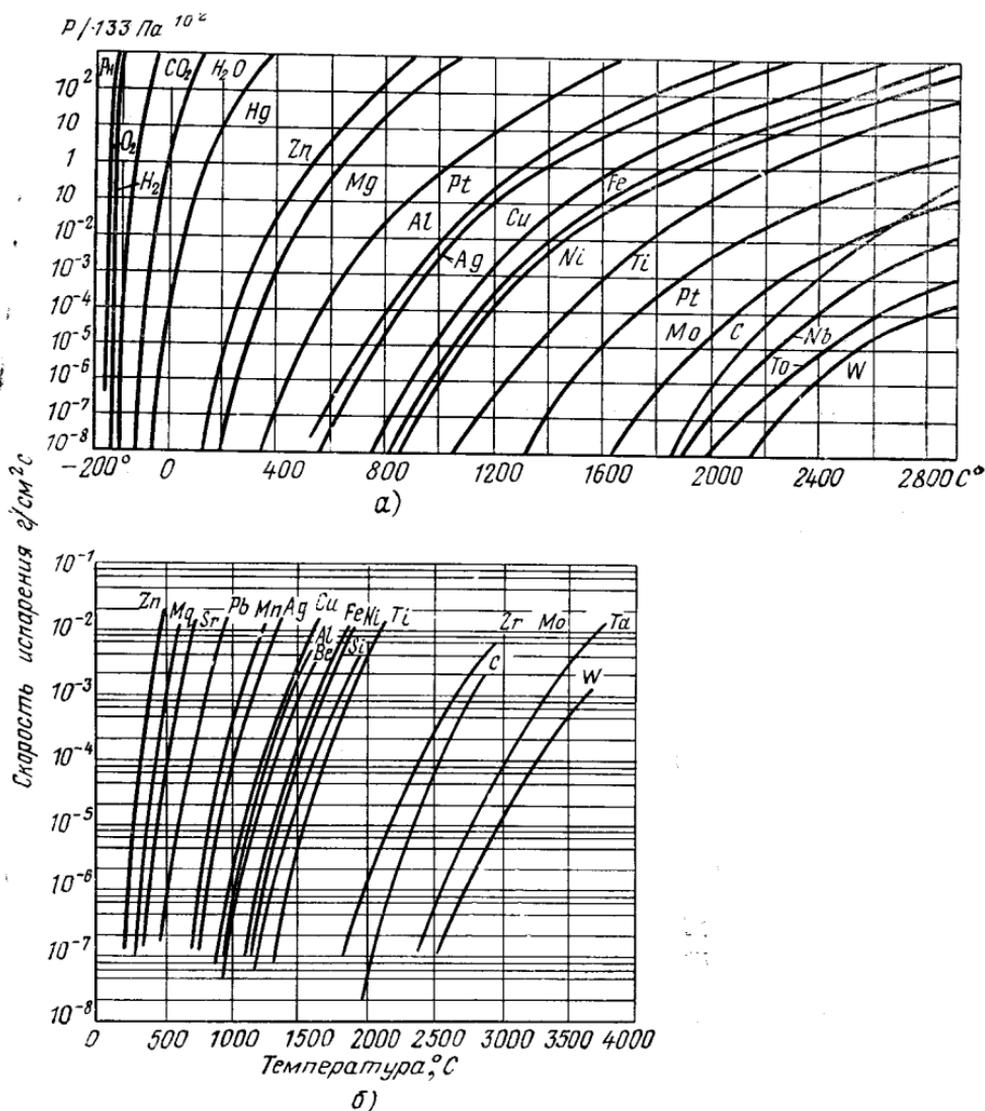


Рис. 11. Упругость пара (а) и скорость испарения (б) некоторых материалов в функции температуры

Температура начала контактных реакций вольфрама с углеродом равна  $1500^\circ\text{C}$ , с окисью бериллия —  $2000^\circ\text{C}$ , окисью магния —  $2000^\circ\text{C}$ , двуокисью циркония —  $1600^\circ\text{C}$ , двуокисью тория —  $2200^\circ\text{C}$ ; для молибдена соответствующие температуры равны  $1500$ ,  $1900$ ,  $1600$ ,  $2200$  и  $1900^\circ\text{C}$ .

Молибден начинает окисляться на воздухе уже при температуре  $400^{\circ}\text{C}$  (наблюдаются цвета побежалости), а при  $600^{\circ}\text{C}$  окисление протекает весьма активно. Окислы молибдена легколетучи, поэтому при попадании кислорода в печь молибденовые детали быстро выходят из строя. Механические свойства молибдена в большей степени зависят от чистоты металла, способа получения, предшествующих механической и тепловой обработки. Молибден сравнительно хорошо поддается прокатке, ковке, гибке. Возможна штамповка с вытяжкой. Гибка молибдена ведется, как правило, с предварительным подогревом до  $400 \dots 850^{\circ}\text{C}$  в зависимости от сечения материала.

Минимальный радиусгиба прутка равен  $\sim 1,5$  диаметра, а листа 2—4 толщины. Отжиг при температуре  $1000 \dots 1100^{\circ}\text{C}$  снижает напряжения в материале и придает молибдену достаточную пластичность. Резка листов на ножницах во избежание хрупкого излома на кромках среза должна производиться при температуре  $350 \dots 450^{\circ}\text{C}$ .

Вольфрам окисляется с образованием легколетучего соединения и поэтому как и для молибдена, даже небольшое содержание кислорода в остаточной среде печи недопустимо. Обработывается он хуже молибдена, однако радиусгиба аналогичен радиусугиба молибдена. Температура подогрева перед гибкой зависит от сечения материала и может достигать  $1150\text{—}1200^{\circ}\text{C}$ . Вальцевать и штамповать вольфрамовый лист можно при условии предварительного подогрева (места и оснастки) до температуры  $600\text{—}700^{\circ}\text{C}$ . Рекристаллизация, ухудшающая свойства вольфрама, наступает при температуре  $1300^{\circ}\text{C}$ . Для снятия остаточных напряжений применяется отжиг при температуре  $1200^{\circ}\text{C}$ . Механическая обработка вольфрама крайне сложна и обычно производится электроническим способом.

Тугоплавкие металлы в вакуумном электропечестроении наиболее часто применяются в виде листа толщиной от 0,1 до 2...3 мм и прутков.

Материалом, который во многих случаях конкурирует с тугоплавкими металлами для изготовления нагревательных элементов вакуумных высокотемпературных электропечей и зачастую даже превосходит их, является графит. Максимальная температура длительного применения в вакууме ограничивается высокой упругостью пара и составляет  $2200^{\circ}\text{C}$ .

Высокая огнеупорность графита, возможность механической обработки на обычных металлорежущих станках а также низкая стоимость в сравнении с тугоплавкими металлами привели к широкому применению графита для изготовления нагревателей. Этому способствует также его сравнительно высокое удельное электросопротивление и небольшой температурный коэффициент электросопротивления, разрешающие при значительном сечении нагревателей применять для их питания напряжения в несколько десятков вольт и подавать на холодные нагреватели непосредственно рабочее напряжение.

Работоспособность нагревателей во многом зависит от марки графита, из которого сделан нагреватель. Для нагревателей оптимально подходит малозольный графит марки ГМЗ.

Графит обладает очень высокой теплопроводностью (при комнатной температуре 100—140 ккал/м·°С·ч) и малым коэффициентом линейного расширения. Благодаря этому он весьма термостоек и мало боится тепловых ударов. В вакуумных электропечах применяются графитовые стержни и графитированная ткань для нагревательных элементов, графитовые крупка и войлок в качестве тепловой изоляции.

В качестве материала нагревателей и элементов футеровки в вакуумных электропечах нашел применение карбид ниобия, обладающий высокой огнеупорностью, сравнительно низкой упругостью пара, достаточной механической прочностью и химической стойкостью. Нагреватели из карбида ниобия применяются в печах до температуры 2500 и даже 2700° С. Срок службы при 2500° С составляет 500 ... 1000 ч. Огнеупорные окислы в качестве футеровочных материалов из-за трудности и длительности их обезгаживания применяются в электропечах с низким вакуумом, не выше 10<sup>-3</sup> мм рт. ст. (~10<sup>-1</sup> Па). Температура их применения ограничивается началом реакций с нагревательными элементами и садкой печи.

Чаще всего в футерованных вакуумных печах в качестве тепловой изоляции до температур 1200—1300° С применяются изделия из легковесных шамота и корунда. Тяжеловесный шамот применяется только тогда, когда по прочностным условиям другой кирпич применить нельзя.

В качестве высокотемпературных электроизоляторов применяются окись алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), реже окись циркония (Zr<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Из окиси алюминия и циркония также изготавливают тигли, трубы, муфели, втулки различной конфигурации, чехлы для термодпар и т. д. Предельная температура использования Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Zr<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в вакуумных печах приблизительно равна соответственно 1700 и 2000° С.

## ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Основной вид теплопередачи в вакуумных печах — излучение. Из-за отсутствия атмосферы, конвективной теплопередачи в печах нет, поэтому теплоизолировать нагревательное пространство вакуумной печи проще, чем печи газонаполненной. Вместе с тем наряду с обычными требованиями, предъявляемыми к тепловой изоляции — достаточная огнеупорность, термостойкость, хорошие теплоизоляционные свойства — теплоизоляция вакуумных печей, кроме того, должна хорошо обезгаживаться, а также должна обладать низкой упругостью пара и не вступать во взаимодействие с нагревателями и садкой.

В соответствии с этим в вакуумных печах широко применяется экранная теплоизоляция из металлических экранов, а в случаях применения футеровки из огнеупорных и теплоизоляционных материалов их количество сводят к минимуму.

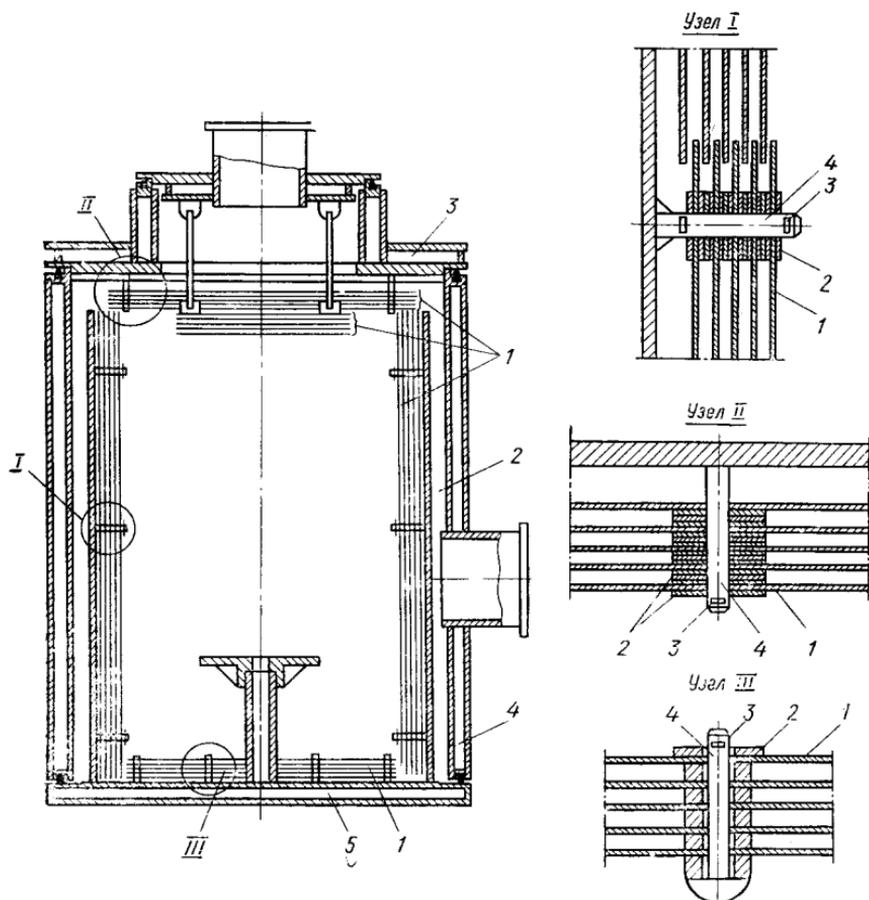


Рис. 12. Вариант исполнения экранной теплоизоляции вакуумной печи:

1—экраны из молибденовой жести; 2—цилиндр из нержавеющей стали (вспомогательный кожух); 3, 4, 5—водоохлаждаемые крышки, кожух и днище печи.  
Узлы I, II, III: 1—экран; 2—шайба; 3—шплинт; 4—шпилька

Поскольку скорость обезгаживания керамики зависит от ее температуры, в вакуумных электропечах теплоизоляционный слой выполняют тонким, рассчитывая его так, чтобы температура на внешней поверхности тепловой изоляции составляла 300—400° С.

Иногда для обеспечения жесткости кладки и упрощения ее сборки и ремонта кирпич выкладывают внутри металлического вспомогательного кожуха, который устанавливают в основном кожухе печи.

Способы размещения и крепления нагревателей в низкотемпературных футерованных вакуумных электропечах не отличаются от способов крепления их в обычных печах.

Тепловая изоляция печей на температуру выше  $1700^{\circ}\text{C}$  с нагревателями из тугоплавких металлов, а также всех высоковакуумных печей выполняется из металлических экранов. Материал экранов в зависимости от их рабочей температуры — жесть толщиной 0,1—0,4 мм из вольфрама, молибдена или нержавеющей стали. Конструирование тепловых экранов представляет определенные трудности, связанные с ограниченным сортаментом листа, особенно из вольфрама, а также с трудностями обработки и сварки вольфрама и молибдена. Поэтому экраны из тугоплавких металлов представляют собой, обычно, небольшие карточки, навешиваемые на штыри, укрепленные на внешнем вспомогательном кожухе из нержавеющей стали [7].

Примеры конструкции экранной теплоизоляции вакуумных печей приведены на рис. 12.

В печах с графитовыми нагревателями [4] в качестве тепловой изоляции используют графит в виде засыпки, плит из пенографита, графитированных войлока и ткани.

Обычно рабочее пространство печи ограничивается графитовыми плитами или кольцами, устанавливаемыми во вспомогательном кожухе. Зазор между графитовыми плитами и этим кожухом заполняется теплоизоляционным материалом.

В печах с нагревателями из карбида ниобия детали внутренней футеровки так же выполняются из карбида ниобия. Тепловая же изоляция делается чаще всего из графита.

## **НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Как и в любой электрической печи сопротивления, нагревательные элементы в вакуумных электропечах являются основным узлом, как правило, определяющим работоспособность печи и срок ее службы. Нагревательные элементы преобразуют электрическую энергию, подводимую к ним, в тепловую, обеспечивая создание в рабочем пространстве печи заданной температуры.

Вакуум создает возможность использования для нагревателей материалов, сильно окисляющихся в воздухе, а также материалов, активно поглощающих газы в нагретом состоянии и вследствие этого теряющих прочность.

Однако вакуум оказывает и отрицательное влияние на работу нагревателей. Дело в том, что с повышением температуры упругость паров материала нагревателя увеличивается, и при достаточно высокой температуре скорость испарения нагревателя иногда достигает столь больших значений, что из-за крайне короткого срока службы применение его становится совершенно нерентабельным.

Конструкции нагревателей из нихрома и хромоалюминиевых сплавов полностью аналогичны применяемым в газонаполненных печах, в основном это зигзагообразные нагреватели, подвешенные на крючках или штырях. Нагреватели хорошо свариваются, гнутся и поэтому их изготовление и соединение с выводными концами не составляет какого-либо труда.

Конструирование нагревателей из тугоплавких металлов представляет зачастую довольно сложную задачу. Сложность объясняется как особенностью технологических свойств этих металлов (трудности сварки, механической обработки), так и химическим взаимодействием их с керамическими элементами кладки печи.

Нагреватели высокотемпературных вакуумных электропечей из тугоплавких металлов можно разделить на три группы.

Первая группа — нагреватели спиральные или зигзагообразные из проволоки. Эти нагреватели мало отличаются от аналогичных в обычных электропечах. Они изготавливаются главным образом из молибденовой проволоки, обладающей достаточной пластичностью и более дешевой, чем вольфрам и тантал. Последнее обстоятельство особенно важно, так как расход металла на спиральные нагреватели относительно велик. Это связано с более низкими допустимыми удельными поверхностными нагрузками на спиральные нагреватели. Нагреватели этого типа рассчитываются на работу при температуре не выше  $1700^{\circ}\text{C}$ . Обычно спиральные нагреватели изготавливаются из проволоки диаметром до  $2 \dots 2,5$  мм. Выводная часть нагревателя делается в виде водоохлаждаемого стержня, причем молибденовая проволока с выводом может соединяться с помощью болтового зажима. Надежность контакта обеспечивается хорошим прижимом проволоки к выводу и водоохлаждением контактной поверхности.

Зигзагообразный нагреватель делается из проволоки большего сечения, чем спиральный, так как он должен обладать большей жесткостью.

В печах, температура которых ниже температуры начала контактных реакций тугоплавких металлов с керамикой, нагреватели либо укладываются на керамические полочки, либо подвешиваются на штырях, заделанных в футеровку. Если же печи не имеют футеровки, а теплоизолируются металлическими экранами, нагреватели в виде зигзага подвешиваются на керамических изоляторах, крепящихся к наиболее холодному экрану (обычно с помощью заделываемых в экран штырей).

Если высокая температура печи не разрешает применения керамики в нагревательном пространстве, нагреватели подвешиваются на металлических крючках, укрепленных на водоохлаждаемом кожухе печи и изолированных от него с помощью изоляторов, расположенных вблизи кожуха.

Вторая группа — проволочные нагреватели в виде стержней. Эти нагреватели применяются при температурах до  $2500^{\circ}\text{C}$ . Материал нагревателей — вольфрам или молибден (в последнем случае рабочая температура нагревателя ограничивается  $1700^{\circ}\text{C}$ ).

На рис. 13 показан один из вариантов такого нагревателя. Молибденовые или вольфрамовые прутки диаметром 4...6 мм вставляются в отверстия в контактных кольцах, выполненных из тугоплавкого металла, и с помощью стопорных винтов или конических штифтов укрепляются в них. При этом одно из колец имеет три прорези, образуя электрическую звезду, каждая фаза которой состоит из нескольких параллельно соединенных прутков.

Наибольшее распространение в высокотемпературных вакуумных печах получил нагреватель из прутков, свободно навешиваемых на токоподводящие дуги из тугоплавких штабиков (рис. 14). Он весьма прост по устройству, надежен и хорошо поддается ремонту.

Большим преимуществом нагревателей этой группы является возможность осуществления токоподвода не охлаждаемыми деталями, благодаря чему снижается величина тепловых потерь и улучшается равномерность распределения температуры в рабочем пространстве. С помощью таких нагревателей построены многозонные вертикальные вакуумные электропечи с высокой равномерностью температурного поля.

Третья группа — нагреватели из тонкого металлического листа. Материал нагревателя — молибденовая или танталовая жесть. Вольфрамовая жесть, как правило, для изготовления таких нагревателей не применяется из-за технологических трудностей, связанных с ее обработкой. Недостатком нагревателей этой группы является их склонность к короблению, недостаточный срок службы нагревателя.

На рис. 15 показан один из вариантов исполнения нагревателя из молибденовой или танталовой жести. Нагреватель представляет собой цилиндр, образованный тремя завальцованными листами толщиной 0,2 мм, скрепленными в нижней части кольцом из полосы толщиной 2 мм. Кольцо обеспечивает жесткое фиксирование нижнего края цилиндра, а также электрическое соединение листов. Кольцо к листам либо варится контактной сваркой, либо приклепывается. В верхней части к каждому листу приварены либо приклепаны полосы, по которым ток подводится к нагревателю, эти же полосы служат для крепления нагревателя на медных водоохладительных токоподводах. Для жесткости нагревателя на боковой поверхности листов, образующих цилиндр, прикреплены горизонтальные зигзагообразные полосы.

Нагреватель трехфазный, электрическая схема выполнена по типу «звезда». Крепление нагревателя только в верхней части обеспечивает свободное температурное расширение. Нагреватели из тонкого листа могут иметь достаточно большие размеры. Известны конструкции трехфазных молибденовых нагревателей диаметром 500 и высотой 1300 мм.

Как показал опыт, эксплуатация такого рода нагревателей требует постоянного, весьма тщательного контроля за вакуумом в печи. Даже кратковременное нарушение вакуума может привести к выходу из строя нагревателя.

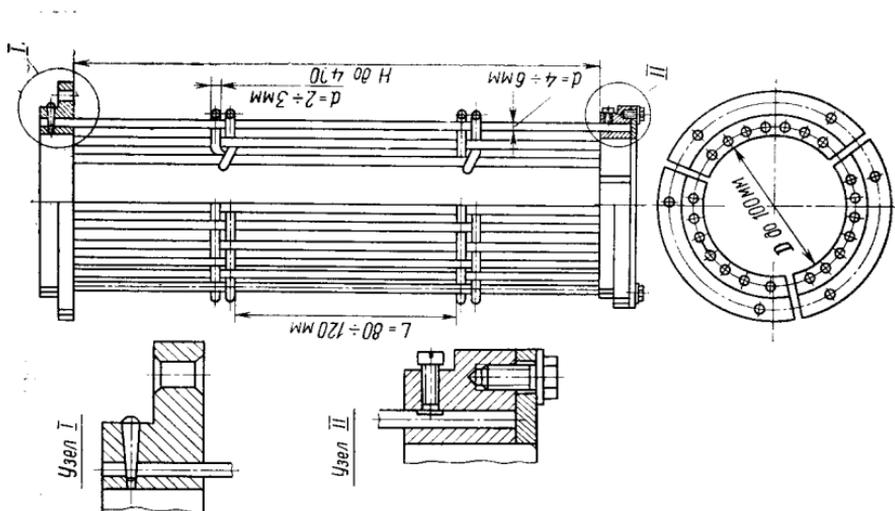


Рис. 13. Пример конструкции стержневого нагревателя вакуумной электропечи

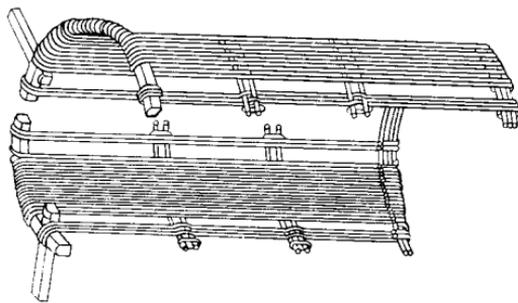


Рис. 14. Нагреватель со свободно висящими прутками

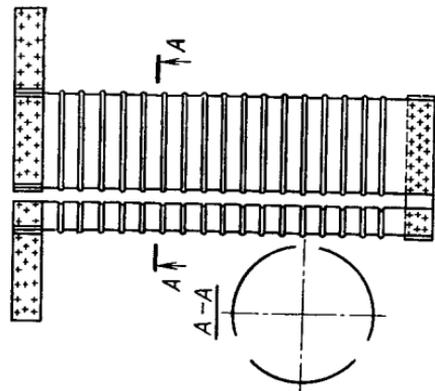


Рис. 15. Нагреватель из тонкого молибденового листа

Выбор понижающего трансформатора для питания вакуумных высокотемпературных электропечей с нагревателями из тугоплавких металлов особенно большой мощности связан зачастую с трудностями, определяемыми отсутствием трансформаторов с достаточным количеством ступеней напряжения, необходимых при пуске печи.

Кроме того, падающая характеристика понижающих трансформаторов (со снижением ступени напряжения предельная мощность трансформаторов также снижается) приводит к недоиспользованию трансформатора по мощности при питании печи на пониженных ступенях напряжения.

Наиболее универсальным решением следует считать последовательное соединение понижающего ступенчатого трансформатора и автотрансформатора с плавным регулированием напряжения, при этом достигается оптимальное использование обоих трансформаторов, а также весьма плавное регулирование теплового режима печи. В современных печах вместо автотрансформатора для питания и регулирования температуры применяются тиристоры. Для непосредственного питания нагревателей вакуумных электропечей сопротивления не следует применять автотрансформатор ввиду того, что значительная разность потенциалов между нагревателями и корпусом печи может привести к пробоем на корпус.

Графит очень широко применяется для нагревателей вакуумных электропечей. Учитывая, что соединение графитовых токоведущих деталей может выполняться с помощью резьб и склеиванием, возможные конфигурации графитовых нагревателей почти не ограничены.

В самое последнее время для изготовления нагревателей начала применяться графитированная ткань, что еще более расширило возможные модификации графитовых нагревателей.

К числу наиболее часто применяемых конструкций графитовых нагревателей относится стержневой (рис. 16), который имеет среднюю рабочую часть и крайние утолщенные выводные части.

Поскольку питание нагревателей обычно осуществляется от стандартных понижающих трансформаторов, имеющих определенные ступени напряжения, сечение нагревателя подгоняется так, чтобы его сопротивление соответствовало питающему напряжению.

Обычно диаметр выводной части в 1,5 ... 2 раза больше диаметра рабочей части нагревателя. В тех случаях когда длина рабочей части нагревателя больше, чем длина имеющейся заготовки, он выполняется составным. Соединение производится на резьбе с помощью графитовой муфты.

Стержневые нагреватели являются универсальными, поскольку могут быть применены в электропечах почти с любой формой и размерами рабочего пространства.

В шахтных вакуумных электропечах с небольшими размерами рабочего пространства применяется трубчатый нагреватель, пред-

ставляющий собой графитовую трубу, охватывающую рабочее пространство печи. Трубчатый нагреватель имеет ряд преимуществ в сравнении с нагревателями стержневыми. Главные из них: меньшие при прочих равных условиях температурные перепады между нагревателем и загрузкой, меньшее количество токоподводов, и, как следствие, снижение тепловых потерь печи.

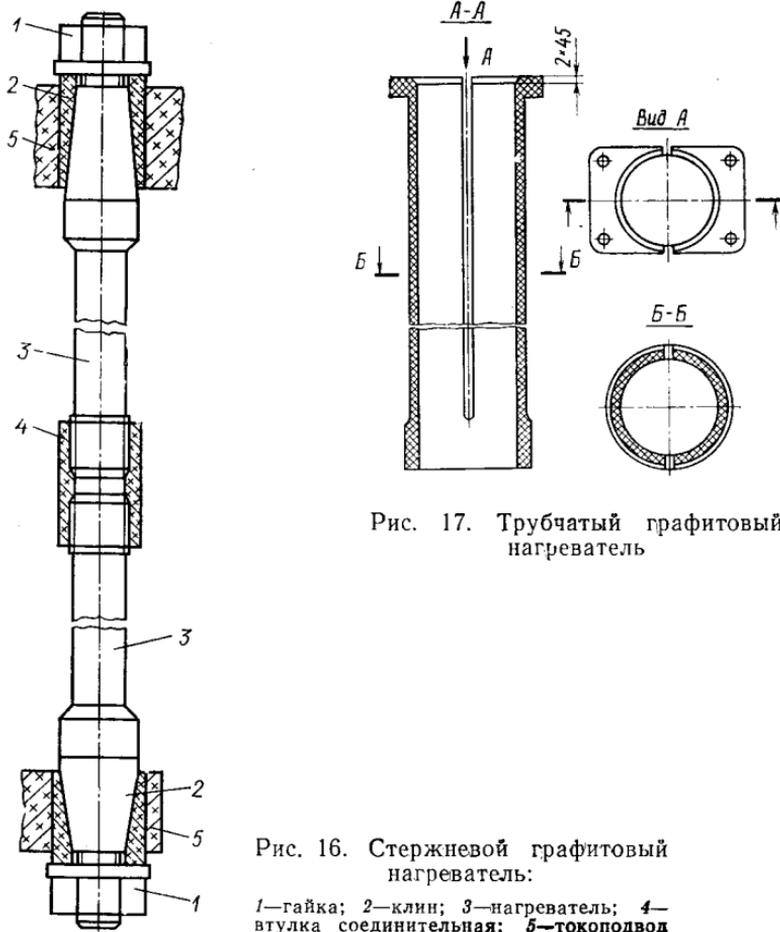


Рис. 17. Трубчатый графитовый нагреватель

Рис. 16. Стержневой графитовый нагреватель:

1—гайка; 2—клин; 3—нагреватель; 4—втулка соединительная; 5—токоподвод

Трубчатые нагреватели могут выполняться однофазными и трехфазными. Простейшим однофазным трубчатым нагревателем является графитовая труба с подводом тока к ее торцам. Этот нагреватель имеет очень узкую область применения главным образом потому, что для обеспечения свободного температурного расширения трубы один из токоподводов должен быть подвижным, что конструктивно выполнить довольно сложно, особенно для подвода больших токов.

На рис. 17 показан вариант графитового трубчатого нагревателя, получивший значительное распространение для небольших

печей. Нагреватель однофазный. Прорези, сделанные на его боковой поверхности, делят нагреватель на две равные, последовательно соединенные части.

Этим достигается увеличение омического сопротивления нагревателя, а также создается возможность жестко закрепить токоподводы, расположенные у одного торца, что позволяет свободное температурное удлинение нагревателя.

На непрорезанном торце нагреватель имеет утолщение, обеспечивающее достаточную механическую прочность и электрическое соединение его обеих частей. На противоположном торце нагреватель имеет фланцы для подсоединения токоподводов.

Во многих случаях питание однофазных печей, особенно при большой их мощности, затруднено из-за несимметричной загрузки фаз, поэтому трубчатые нагреватели в мощных печах выполняются трехфазными.

Конструктивно они аналогичны однофазному, но вместо двух имеют три прорези, делящие нагреватель на три равные по электросопротивлению части, соединенные на торце в звезду.

В печах, обрабатывающих углеродосодержащие материалы, температура которых превосходит  $2200^{\circ}\text{C}$  (до  $2500 \dots 2700^{\circ}\text{C}$ ), применяются нагреватели из карбида ниобия в виде прямых стержней или U-образные.

## КОНСТРУКЦИИ САДОЧНЫХ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Садочные печи, как правило, применяются в индивидуальном или мелкосерийном производстве и отличаются относительно небольшой производительностью. В массовом производстве садочные печи применяют только в тех случаях, когда создание печи непрерывного действия для данных изделий и данного технологического процесса затруднено.

Принципиально любой тип газонаполненной садочной электропечи может иметь вакуумное исполнение, однако наибольшее распространение получили садочные вакуумные электропечи: камерные, шахтные, колпаковые, элеваторные.

Ниже приводится описание принципа устройства этих электропечей и соображения, положенные в основу их конструирования.

**а) Камерные электропечи** могут применяться для различных технологических процессов, в том числе для отжига, дегазации, спекания, пайки, сушки и т. д. Их следует подразделить на:

- 1) электропечи, в которых герметичность обеспечивается наружным водоохлаждаемым кожухом, — безмуфельные;
- 2) электропечи, в которых садка помещается в герметичную нагреваемую металлическую камеру, — муфельные.

Схема конструкции безмуфельной электропечи следующая: нагревательная камера заключается в металлический герметичный охлаждаемый кожух, к которому подсоединена соответствующая откачная система. Рабочая температура печи регламен-

тируется только огнеупорностью футеровки и стойкостью нагревателей. Поскольку в период работы кожух остается холодным, условия его герметизации не нарушаются.

Футеровка этих печей выполняется либо из керамических огнеупорных материалов, либо из металлических экранов. Печи, футерованные огнеупорным кирпичом, обладают большой тепловой инерцией, требуют значительного количества энергии и времени на их разогрев и очень медленно охлаждаются. Электропечи с экранной теплоизоляцией могут быть быстро разогреты, аккумулируют мало тепла и быстрее охлаждаются, но зато тепловые потери у этих печей обычно много больше, чем у футерованных огнеупорными материалами.

В муфельных печах жароупорный герметичный муфель, как правило, цилиндрической формы, помещается в обычную (не вакуумную) электропечь. К муфелю подсоединяются откачные насосы, обеспечивающие в нем необходимое разрежение. Садка помещается внутрь муфеля. Поскольку в муфеле, кроме садки, нет никаких деталей, требующих обезгаживания, он может быть откачан быстро и до высокого вакуума. Однако эти печи работают при низких температурах, так как прочность разогретого муфеля, испытывающего весьма значительные механические нагрузки от атмосферного давления, невелика. Кроме того, при высоких температурах как через сварные швы, так и через стенки муфеля увеличивается диффузия воздуха, затрудняющего создание высокого вакуума и окисляющего садку.

В зависимости от диаметра, толщины стенки и материала муфеля предельная рабочая температура такого рода печей ограничивается 800 ... 1100° С.

Для того чтобы повысить предельную рабочую температуру муфеля, его помещают не в открытую, а в вакуумную электропечь, но рассчитанную на низкий вакуум в несколько миллиметров ртутного столба. Таким образом, за счет значительного снижения перепада давления удается разгрузить стенки муфеля от сдвигающих усилий, благодаря чему рабочая температура печи может быть повышена до 1150 ... 1200° С. Кроме того, создание вакуума вокруг муфеля снижает его окисление и диффузию воздуха через стенки.

В ряде случаев наличие муфеля дает возможность повысить производительность вакуумной электропечи, так как охлаждение садки может вестись в муфеле, вне печи, в то время как в печи идет нагрев очередного муфеля; для этого должно быть предусмотрено быстроразъемное устройство, снабженное вакуумным затвором, позволяющее отсоединить муфель от откачной системы, не напустив в него воздух. Такой характер работы, кроме увеличения производительности, дает во многих случаях значительную экономию электроэнергии, так как отпадает необходимость в охлаждении садки вместе с печью.

К числу камерных электропечей можно отнести контейнерные (рис. 18), представляющие собой подвижную нагревательную ка-

меру и несколько стационарных муфелей. Камера поочередно наезжает и последовательно нагревает каждый муфель (контейнер). Имеется модификация контейнерных печей, в которой нагревательная камера неподвижна, а перемещаются контейнеры вместе с откачной системой, смонтированные на специальных тележках.

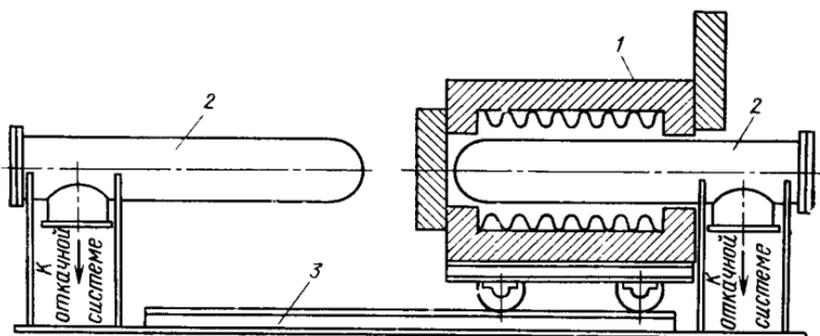


Рис. 18. Схема устройства контейнерной вакуумной электропечи с неподвижными контейнерами и передвижной нагревательной камерой:

1—нагревательная камера; 2—контейнер; 3—рельс

Обычно контейнерные вакуумные электропечи используются для нагрева длинномерных изделий — труб, профилей и др.

Значительное распространение получили вакуумные камерные печи с выдвигным подом, предназначенные для нагрева больших и тяжелых садок.

Печь представляет собой камеру, подина которой смонтирована на тележке и выкатывается из печи вместе с садкой.

Загрузку и выгрузку садки обычно ведут цеховым краном. К недостаткам печей с выдвигным подом относятся повышенные тепловые потери при выкатывании разогретого пода из печи и тяжелые условия труда персонала у разогретого пода во время разгрузочных и загрузочных работ. Эти печи, в частности, нашли применение для нагрева крупных заготовок перед обработкой давлением.

Иногда камерные печи с выдвигным подом делают проходными, т. е. выкатывают под по окончании нагрева в сторону, противоположную стороне загрузки. В ряде случаев это позволяет удобнее разместить технологическое оборудование, примыкающее к печи, организовать поточное производство или повысить производительность печи за счет уменьшения простоев на загрузку.

В табл. 9 приведены основные технические данные некоторых типов камерных вакуумных электропечей сопротивления.

б) **Шахтные электропечи** имеют вертикальную шахту цилиндрической (реже — прямоугольной) формы, загружаемую сверху. Тип печи очень распространен среди вакуумных садочных печей. В шахтных печах садка может находиться в подвешенном состоя-

Основные технические данные камерных вакуумных электродов сопротивления

Тип	Мощность установленная, кВт	Напряжение се- тяющей се- ти, В	Рабочий вакуум, мм рт. ст. (Па)	Рабочая тем- пература, °С	Размеры рабочего пространства, мм			Расход охлаж- дающей воды, м³/ч	Масса печи, т	Примечание
					ширина (ди- метр)	длина	высота			
СНВЛ1.3.1/16ЭМ1	25	380/220	10-4 (10 <sup>-2</sup> )	1600	100	300	100	1	1,6	Лабораторные нагре- ватели из вольфрама, теплоизоляция экранная
СНВЛ1.3.1/20ЭМ1	40	380/220	10-4 (10 <sup>-2</sup> )	2000	100	300	100	1,8	1,7	
1СНВ5.10.5/11.5Ф	152	380/220	10-3 (10 <sup>-1</sup> )	1150	500	1000	500	15	15	Закалочная, нагрева- тели из никрома, тепло- изоляция керамическая
КСНВ5.10.5/13Г	180	380/220	10-3 (10 <sup>-1</sup> )	1300	500	1000	500	15	14	Закалочная, нагревате- ли и теплоизоляция гра- фитовые
ОКБ-137И	310	380/220	10-4 (10 <sup>-2</sup> )	900	270	8000	—	16	62,5	Муфельные. Нагрева- тельная камера пооче- редно наезжает на один из четырех муфелей
ОКБ-137А	384	380/220	10-4 (10 <sup>-2</sup> )	900	270	10000	—	16	93,3	
СНВ5.15.5/11.5М2	170	380/220	10-5 (10 <sup>-3</sup> )	1150	500	1500	500	8		Печь с выдвижным по- дом. Нагреватель из мо- либдена, теплоизоляция экранная
СНВ5.15/9ЭМ1	170	380/220	10-5 (10 <sup>-3</sup> )	900	500	1500	500	6,5	11,6	Печь с выдвижным подом. Нагреватель из никрома, теплоизоляция экранная
СНВ15.30.5/11.5М3	485	380/220	10-3 (10 <sup>-1</sup> )	1150	1500	3000	500	9	53	Печь с выдвижным подом. Нагреватель ни- хромовый, теплоизоля- ция керамическая

нии, чем удается избежать деформации нагреваемых деталей и контакт их с материалом подставки. В этих печах сравнительно просто решаются вопросы применения конструкции высокотемпературных нагревателей. Шахтные вакуумные печи выполняются безмуфельными (рис. 19); муфельными и муфельными с контрвакуумом, в принципе они аналогичны соответствующим камерным.

Сущность конструкции шахтной печи, показанной на рис. 19, состоит в том, что для ускорения охлаждения садка убирается в холодильную камеру, установленную на горловине печи и герметично примыкающую к ней. Холодильная камера снабжена механизмом, с помощью которого предварительно подвешенная садка может быть загружена в нагревательную камеру печи или поднята из нее в холодильную камеру. Между холодильной камерой и печью устанавливают технологический водоохлаждаемый затвор, позволяющий снимать камеру для выгрузки остывшей и загрузки очередной садки без напуска воздуха в разогретую печь. Такая система дает некоторое повышение производительности за счет увеличения скорости охлаждения садки и сохранения тепла, аккумулированного футеровкой. Однако наличие только одного затвора не разрешает загрузить в печь очередную садку до полного остывания садки, находящейся в холодильной камере, это снижает коэффициент использования печи.

Установкой второго затвора последовательно с первым обеспечивается возможность смены холодильных камер немедленно после выгрузки садки из нагревательной камеры, благодаря чему простой печи становится минимальным, определяемым только временем загрузки, выгрузки и смены холодильной камеры.

В табл. 10 приведены основные технические данные некоторых типов шахтных вакуумных печей.

в) Элеваторные печи — печи с загрузкой снизу. Возможны следующие конструктивные варианты таких печей:

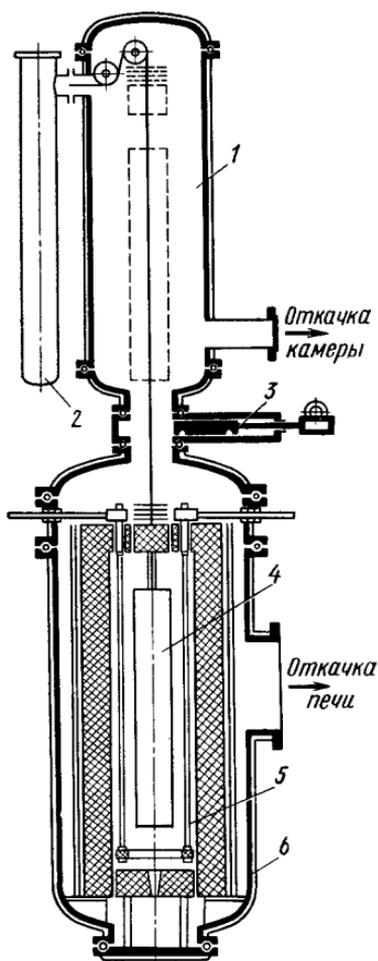


Рис. 19. Безмуфельная шахтная вакуумная электропечь с холодильной камерой:

1—холодильная камера; 2—механизм загрузки; 3—вакуумный затвор; 4—садка; 5—нагреватель; 6—кожух печи

1. С загрузочным поддоном (рис. 20). Печь представляет собой колпак, поднятый над уровнем пола и закрепленный неподвижно. Сменный поддон, являющийся одновременно днищем печи с садкой, подводят под колпак и с помощью механизма поднимают так, что садка оказывается в нагревательной камере, а фланец поддона, снабженный уплотнением, плотно прижимается к уплотняющей поверхности колпака, герметично запирая нагревательную камеру.

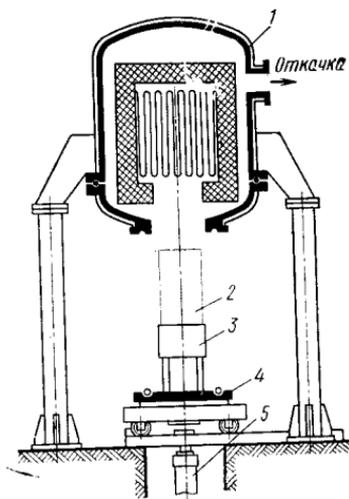


Рис. 20. Элеваторная вакуумная печь с загрузочным поддоном:

1—нагревательная камера; 2—садка; 3—под; 4—загрузочный поддон; 5—механизм загрузки

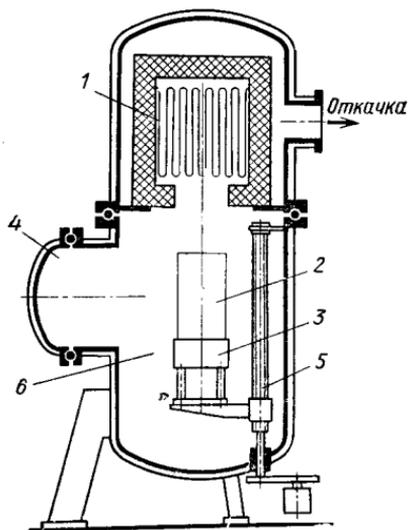


Рис. 21. Элеваторная вакуумная печь с холодильной камерой:

1—нагревательная камера; 2—садка; 3—под; 4—загрузочный люк; 5—механизм подъема садки; 6—холодильная камера

2. Печи с холодильной камерой и подвижным подом (рис. 21) составляют большинство элеваторных вакуумных печей, представляют собой сочетание камер: верхней (нагревательной) и нижней (холодильной), выполненной в виде водоохлаждаемого кожуха. Изделие через люк в холодильной камере помещают в печь и устанавливают на под, который с помощью механизма той или иной конструкции поднимают, вводя садку в нагревательную камеру. Нагревательная и холодильная камеры откачиваются одновременно. По окончании нагрева под опускается и нагретое изделие попадает в холодильную камеру.

Иногда для ускорения остывания садки холодильная камера снабжается вентилятором и заполняется нейтральным по отношению к садке газом. В низкотемпературных печах этого типа температуру в нагревательной камере во время охлаждения садки можно поддерживать постоянной; в высокотемпературных печах

Основные технические данные некоторых типов шахтных вакуумных электрических печей сопротивления

Тип	Мощность установлен- ная, кВт	Напряже- ние питаю- щей сети, В	Рабочий вакуум, мм рт. ст. (Па)	Рабочая температу- ра, °С	Расход охлаждаю- щей воды, м <sup>3</sup> /ч	Размеры рабочего пространства		Масса печи, т	Примечание
						диаметр	высота		
СШВЛ ЭМ1	10	380/220	10-4 (10 <sup>-2</sup> )	1600	0,5	60	200	0,65	Лабораторная. Нагре- ватель молибденовый, теплоизоляция экранная
СШВЛ ЭМ1	55	380/220	10-4 (10 <sup>-2</sup> )	2500	2,5	100	250	1,75	То же
СШВ 8,8/9 ЭМ1	154	380/220	10-4 (10 <sup>-2</sup> )	900	6,5	800	800	6	Нагреватель никро- мовый, теплоизоляция экранная
СШВ ЭМ1	565	380/220	10-4 (10 <sup>-2</sup> )	900	19	1100	3850	19,5	То же
СШВ ЭМ1	303	380/220	10-5 (10 <sup>-3</sup> )	1300	12	800	1200	19,5	Нагреватель молибде- новый, теплоизоляция экранная
СШВ 2.20/ЭМ3	570	380/220	10-5 (10 <sup>-3</sup> )	2000	30	200	2000	46,4	Печь многозонная (по- луперывного дейст- вия). Нагреватели воль- фрамовые, теплоизоля- ция экранная
СШВ 27.45/9 М1	490	380/220	10-1 (10 <sup>1</sup> )	900	20	2700	4500	66,5	Электропечь с керами- ческой футеровкой, наг- реватели никромовые
СШВ ГМ1	58	380/220	10-1 (10 <sup>1</sup> )	1300	6	300	300	2,8	Нагреватели и футе- ровка графитовые. Печь предназначена для за- калки деталей в интен- сивном газовом потоке



Основные технические данные некоторых типов элеваторных вакуумных электрических печей

Тип	Мощность установлен- ная, кВт	Напряжение питающей сети, В	Рабочий вакуум, мм рт. ст. (Па)	Рабочая температу- ра, °С	Расход охлаждаю- щей воды, м³/ч	Размеры рабочего пространства, мм		Масса печи, т	Примечание
						диаметр	высота		
СЭВ ФМ1	15	380/220	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-1</sup> )	1150	0,5	200	200	2,5	Фугованная с холо- дильной камерой. Нагре- ватель нихромовый. Име- ет бак для закалки в масле
СЭВ ФМ1	22	380/220	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-1</sup> )	1150	0,5	300	300	2,3	Фугованная с холо- дильной камерой. Нагре- ватель нихромовый
СЭВ ФМ1	67	380/220	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-1</sup> )	1150	1,5	500	500	5,2	То же »
СЭВ ФМ2	34	380/220	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-1</sup> )	1150	1,5	300	300	2,9	Имеет бак для закал- ки в масле
СЭВЭ 1.7/2041	100	380/220	10 <sup>-6</sup> (10 <sup>-4</sup> )	2000	2,5	100	700	4,5	Полупрерывного действия. Нагреватель вольфрамовый, тепло- изоляция экранная
СЭВ 1.2/22 ЭМ1	75	380/220	10 <sup>-7</sup> (10 <sup>-5</sup> )	2200	2,5	100	200	2,5	То же
ИСЭВ 2.5.5/22Э	380	380/220	10 <sup>-8</sup> (10 <sup>-6</sup> )	2200	7	250	500	12,4	»

СЭВ МОЧ	11.8/13	540	380/220	10-3 (10-1)	1300	25	1100	800	25,3	С загрузочным поддо- ном. Нагреватель мс- либеновый, теплоизо- ляция экранная
СЭВ ЭМ2	11.5,5/16	353	380/220	10-5 (10-3)	1600	17	1100	550	39,3	С загрузочным поддо- ном. Нагреватель молиб- деновый, теплоизоля- ция экранная
СЭВ 5.5/16 ЭМ1		340	380/220	10-5 (10-3)	1600	19	500	500	15	То же Печь вакуумно-водо- родная
СЭВ 8.8/16 ЭМ1		510	380/220	10-5 (10-3)	1600	15	800	800	39,2	С загрузочным поддо- ном. Нагреватель молиб- деновый, теплоизоляция экранная
1СЭВ 12.12/16		950	380/220	10-5 (10-3)	1600	40	1200	1200	32	То же
1СЭВ 2.5.5/20 Э		200	380/220	10-5 (10-3)	2000	8	250	500	12,9	С загрузочным поддо- ном. Нагреватель воль- фрамовый, теплоизоля- ция экранная
СЭВ 3.6/22 ГМ3		218	380/220	10-4 (10-2)	2200	11	300	600	11,8	С загрузочным поддо- ном. Нагреватели и теп- лоизоляция графитовые

риалов возможно только после полного остывания нагревателей и садки. В низкотемпературных печах напуск воздуха под не остывший колпак возможен только при условии, что садка защищена муфелем, в котором в течение всего времени нагрева поддерживается требуемое разрежение. Естественно, механическая прочность муфеля должна быть достаточной, чтобы противостоять атмосферному давлению.

Если создать достаточно прочный муфель нельзя, откачивается одновременно пространство под колпаком и муфелем (рис. 22), а перед снятием колпака пространство под колпаком и муфелем одновременно заполняется защитным газом.

Среднетемпературные и высокотемпературные колпаковые печи могут иметь два исполнения, в которых все элементы конструкции (теплоизоляция, нагреватели, токоподводы, откачные насосы) монтируются на стенде, колпак не служит только для образования вакуумного объема и герметизации печи; в которых нагреватели и тепловая изоляция колпака смонтированы на колпаке, а откачная система на стенде. Подвод тока к нагревателям последний осуществляется гибким, охлаждаемым кабелем. Выполнение установки из двух колпаков, когда во время нагрева садки под одним из колпаков, под вторым происходит ее охлаждение, разрешает лучше использовать откачное и электрическое оборудование печи.

д) **Печи контактного нагрева.** В этих печах нагрев осуществляется подводом напряжения и пропусканием тока непосредственно через нагреваемую деталь.

Поэтому контактный нагрев применим только для деталей, обладающих постоянным сечением по длине и достаточно большим омическим сопротивлением. При малом сопротивлении питание печей приходится осуществлять очень низким напряжением, а ток, протекающий по детали, весьма велик, что затрудняет осуществление токоподвода, особенно, если учесть необходимость устройства герметичного ввода внутрь вакуумного объема. Кроме того, контакты, подводящие ток к детали, приходится выполнять водоохлаждаемыми, из-за чего температура торцов нагреваемой детали бывает ниже, чем средней части.

В числе преимуществ вакуумных электропечей контактного нагрева относительная конструктивная простота, большая скорость нагрева, возможность получения сколь угодно высоких тем-

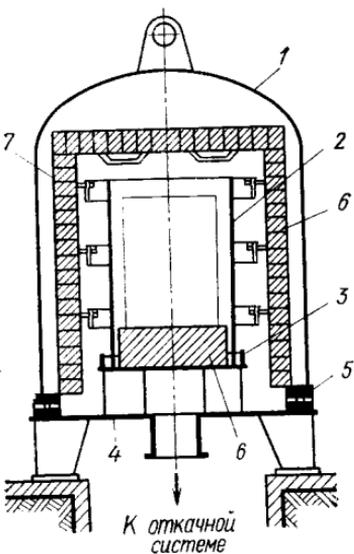


Рис. 22. Колпаковая вакуумная печь с откачивающим колпаком и негерметичным муфелем:

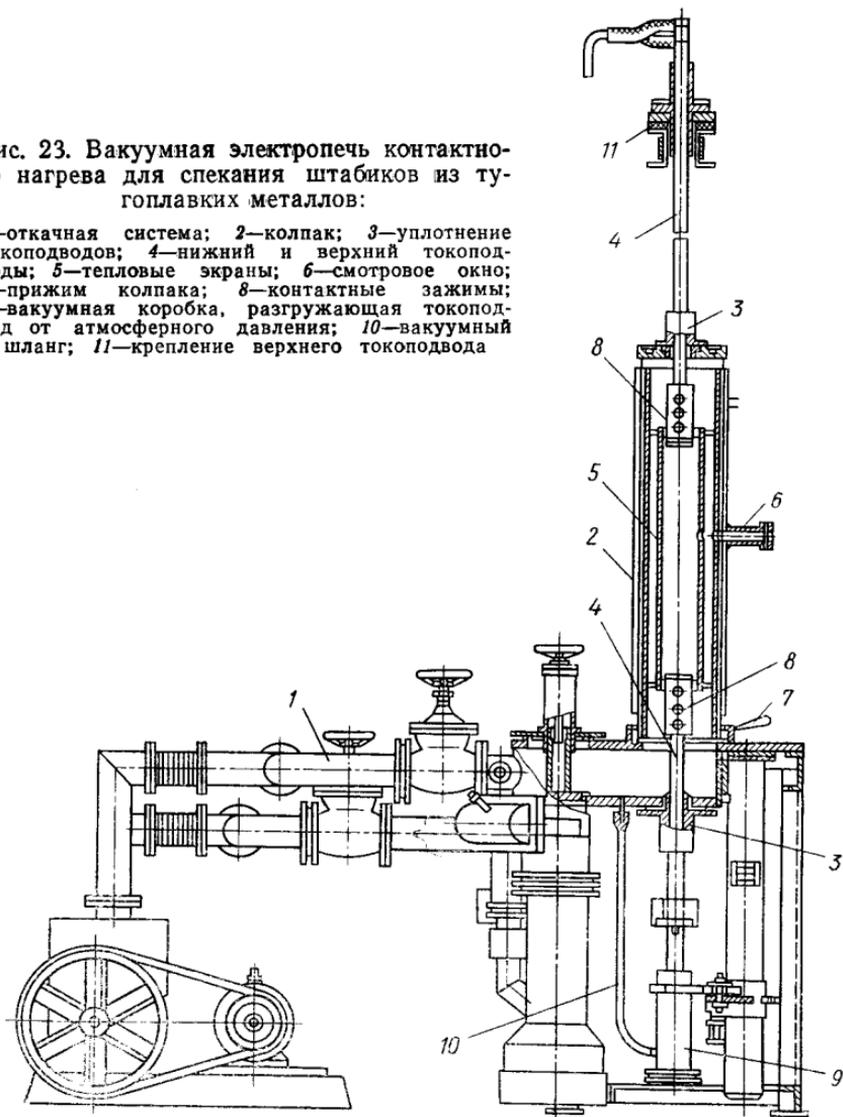
1—колпак; 2—муфель; 3—песочный затвор; 4—стенд; 5—вакуумное уплотнение; 6—футеровка; 7—нагреватель

ператур, как правило, без применения или при минимуме тугоплавких металлов.

Примером применения вакуумных печей контактного нагрева являются печи для спрессованных штабиков из тугоплавких металлов (контактные аппараты, рис. 23).

Рис. 23. Вакуумная электропечь контактно-го нагрева для спекания штабиков из тугоплавких металлов:

1—откачная система; 2—колпак; 3—уплотнение токоподводов; 4—нижний и верхний токоподвод; 5—тепловые экраны; 6—смотровое окно; 7—прижим колпака; 8—контактные зажимы; 9—вакуумная коробка, разгружающая токоподвод от атмосферного давления; 10—вакуумный шланг; 11—крепление верхнего токоподвода



## ВАКУУМНЫЕ ЭЛЕКТРОПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Вакуумные электропечи непрерывного действия включают в себя шлюзовые камеры (загрузочную и разгрузочную), камеры нагрева и охлаждения, систему устройств для перемещения садки в печи и откачную систему.

Шлюзовые камеры служат для загрузки в печь садки без нарушения вакуума в камере нагрева и могут выполняться прямыми и угловыми. В прямых шлюзовых камерах (рис. 24) проем, через который садка загружается в шлюз, и проем, через который садка перегружается в рабочую зону печи, расположены на одной прямой. Это предопределяет расположение механизмов перемещения садки непосредственно в шлюзе. В угловых шлюзовых камерах (они показаны на рис. 25) механизмы перемещения садки вынесены наружу, в шлюз введены только штоки толкающего (таскающего) механизма. Шлюзовые камеры снабжены мощными откачными системами для сведения времени их откачки к минимуму.

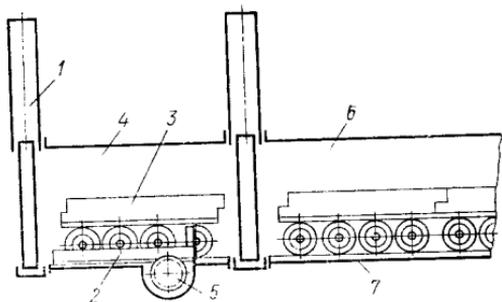


Рис. 24. Прямая шлюзовая камера с механизмом перемещения тележки, расположенным внутри шлюза (вид сбоку):

1—вакуумные затворы; 2—реечный толкатель; 3—поддон; 4—шлюзовая камера; 5—шестерня; 6—нагревательная камера; 7—направляющая (рельс)

Камера нагрева проходного типа в зависимости от технологического процесса и нагреваемого материала теплоизолируется огнеупорным кирпичом, графитом или металлическими экранами. Нагреватели выполняют из нихрома, тугоплавких металлов, графита. Поскольку продолжительность разогрева методической печи до рабочей температуры и время первоначальной откачки до заданного вакуума существенного значения не имеют и на производительности печи не сказываются, при прочих равных условиях методические печи имеют более мощный слой теплоизоляции, чем садочные.

В вакуумных методических (особенно толкательных) печах важен правильный выбор материала поддонов и направляющих, поскольку при высоких температурах в вакууме может происходить их спекание. Вполне удовлетворительными свойствами обладает пара трения «графит по графиту». Вопрос транспортирования металлических поддонов в высокотемпературных вакуумных печах, где графитовые детали не могут быть применены, пока является предметом исследований.

Камера охлаждения примыкает к нагревательной камере и должна обеспечить быстрое охлаждение садки, так как выдача на воздух неостывшей садки может привести к ее окислению. Камера представляет собой водоохлаждаемый нефутерованный кожух. Садка, проходя через камеру, теряет тепло за счет излучения.

По принципу перемещения садки применение нашли следующие разновидности методических вакуумных электропечей.

1. Толкательные печи, у которых садка на поддонах перемещается по направлению с помощью толкательного механизма

(рис. 25). Печи просты, но требуют для поддонов и направляющих подбора материалов, исключая их спекание и имеющих невысокий коэффициент трения; поддоны должны обладать достаточной механической прочностью при рабочей температуре печи.

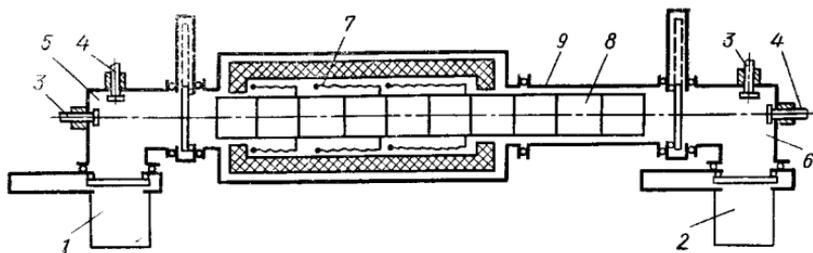


Рис. 25. Схема толкательной вакуумной печи (план):

1—загрузочный стол; 2—разгрузочный стол; 3—толкатель; 4—таскатель; 5—загрузочный шлюз; 6—разгрузочный шлюз; 7—нагревательная камера; 8—поддон; 9—холодильная камера

К числу толкательных можно отнести тоннельные печи. В этих печах поддоны заменяются футерованными тележками на колесах, перемещающимися по рельсовому пути. Ходовая часть тележек (подшипники, оси, колеса) и рельсы, отделенные от рабочего пространства футерованным подом — тележкой, имеют невысокую температуру и работают надежно.

2. Печи с шагающим подом, последовательно переставляющим поддоны от загрузочной к разгрузочной стороне печи. В этих печах поддон испытывает значительно меньшие механические нагрузки, чем в толкательных; здесь отсутствует так же трение поддона о направляющие.

3. Многокамерные печи с перекатной тележкой (аналогичные туннельным) представляют собой последовательно соединенные камеры, в которых поддерживаются те или иные температурные режимы. Камеры отделены друг от друга вакуумными технологическими затворами. Садка, загруженная на футерованные тележки — поддоны, последовательно проходит термическую обработку в каждой из этих камер. Наличие вакуумных технологических затворов между камерами позволяет одновременно обрабатывать садку с большим газонасыщением и дегазированную, не загрязняя последнюю газами, выделяемыми из только что загруженной в печь садки.

В табл. 12 приведены технические данные вакуумных электропечей непрерывного действия.

4. Для термической обработки ленты и проволоки нашли применение вакуумные протяжные печи.

Печи могут иметь две принципиально различные схемы: печи с размоточным и намоточным барабанами в вакуумных камерах, примыкающих к печи, и печи с барабанами, расположенными снаружи. В печах, работающих по первой схеме, после смотки

## Основные технические данные вакуумных электропечей непрерывного действия

Наименование параметра	Тип печи						Примечание
	СТВ-3, 23, 16/14,5 ТХ1 М1	СЛВ 16, 128, 16/14,5 Х64 М2	СЛВ 16, 128, 16/14,5 Х64 М5	СТВ 3, 8, 15, 2/20Х30,4 М02	СТВ 3, 8, 38/16-Х30,4 М3	ОКБ-8140	
Мощность, кВт установленная в т. ч. нагревательной камеры	140	1380	1760	550	620	115	В электропечах СЛВ 16, 128, 16/14,5 Х64М2 и СЛВ16, 128, 16/14,5×64М5 загрузочный шлюз представляет собой низкотемпературную нагревательную камеру. Мощность, рабочая температура и рабочий вакуум для этих печей указаны соответственно для низкотемпературной и высокотемпературной камер. В печи СЛВ 16, 128/14,5Х64М5 загрузочный шлюз снабжен мощными вентиляторами для ускорения охлаждения садки с целью ее закалки
Напряжение питающей сети, В	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220	
Число фаз, шт.	1	3	3	3	3	1	1
Число тепловых зон, шт.	2			1	4	2	2
Рабочая температура, °С	1450	900 и 1450	900 и 1450	2000	1600		
Рабочий вакуум, мм рт. ст. (Па)	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-1</sup> )	10 <sup>-1</sup> и 10 <sup>-3</sup> (10 <sup>1</sup> и 10 <sup>1</sup> )	10 <sup>-1</sup> и 10 <sup>-3</sup> (10 <sup>1</sup> и 10 <sup>-1</sup> )	10 <sup>-3</sup> (10 <sup>-1</sup> )	5·10 <sup>-2</sup> (5)	10 <sup>-1</sup> (10 <sup>1</sup> )	10 <sup>-1</sup> (10 <sup>1</sup> )
Расход охлаждающей воды, м <sup>3</sup> /ч	4,5	110	150	25	30	2,7	
Размеры поддона или тележки, мм	140	1200	1200	900	500	140	
ширина	315	6000	6000	200	200	315	
длина	127	400	300	240	150	120	
высота							
Габаритные размеры печи, мм	1800	11500	11500	4700	5200	2550	
ширина	8200	44000	44000	9900	11500	9600	
длина	3200	7200	5100	3150	7800	21500	
высота							
	5	177	180	35	42	50	

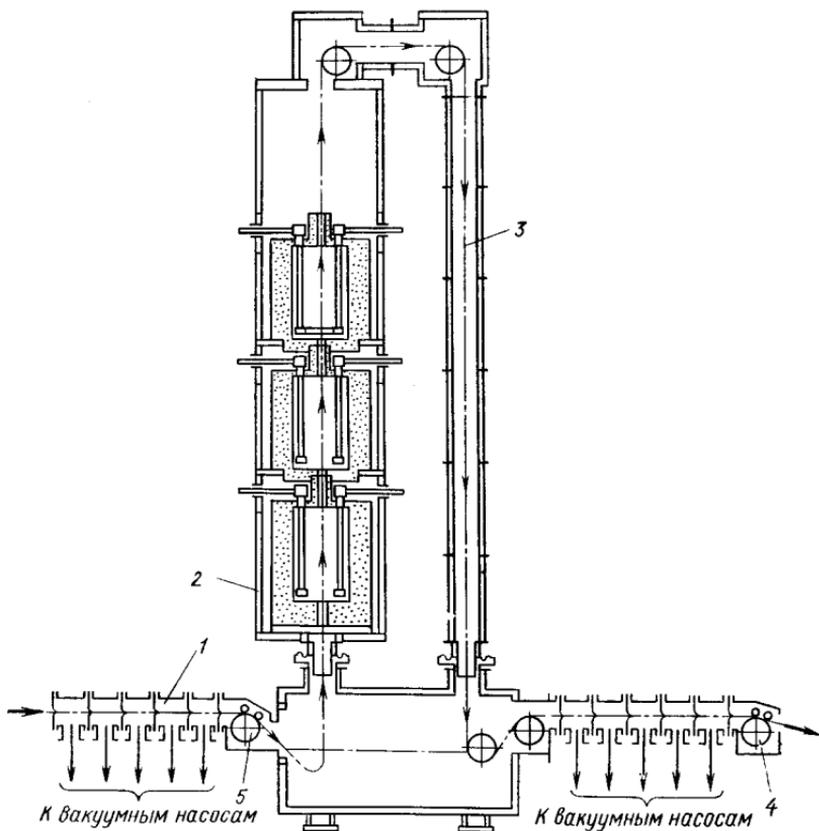


Рис. 26. Схема протяжной вакуумной электропечи с динамическими уплотнениями:

1—динамическое уплотнение; 2—нагревательная камера; 3—камера охлаждения; 4, 5—механизмы перемещения ленты (проволоки)

рулона ленты или бунта проволоки внутренний объем заполняется воздухом. На размоточный барабан надевается очередной рулон и с намоточного барабана снимается рулон, прошедший термическую обработку. Тем или иным способом ленту протягивают через нагревательную камеру печи и закрепление конца на намоточном барабане. После этого печь вновь герметизируется, откачивается и осуществляется новый цикл нагрева.

Печи с барабанами, расположенными снаружи (рис. 26), оборудуются динамическими уплотнениями, разрешающими непрерывный ввод ленты или проволоки внутрь вакуумного объема. Уплотнение представляет собой несколько последовательно соединенных камер, на границе которых установлены уплотняющие устройства в виде обжимающих протягиваемую ленту или проволоку роликов, прокладок и др. При этом каждая камера снабжена вакуумным насосом, откачивающим воздух, натекающий за счет несовершенства уплотнительного устройства.

Описанные выше конструктивные исполнения вакуумных электропечей сопротивления не исчерпывают возможные варианты. Новые предъявляемые к печам требования приводят к созданию новых оригинальных конструкций.

---

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем заключается принцип действия вакуумных электропечей: дуговых, плазменных, электронно-лучевых, с ионным нагревом, индукционных и сопротивления?
  2. Какие виды тепловой изоляции применяются в вакуумных электропечах и какие материалы для нее используются?
  3. Какие типы нагревателей используются в вакуумных электропечах сопротивления и из каких материалов они изготавливаются?
  4. Назовите основные типы вакуумных садочных электропечей сопротивления и их отличительные особенности.
  5. Как работают вакуумные электропечи непрерывного действия (как устройства шлюзовые камеры)?
-

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабат-Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. М., Атомиздат, 1975. 84 с.
2. Барабанов И. В. Оборудование для термической обработки в вакууме. М., «Машиностроение», 1975. 33 с.
3. Волохонский П. А. Теплофизические процессы и энергетический баланс при плавке в гарнисаже. М., ВНИИЭМ, 1965. 56 с.
4. Гурвич О. С., Ляхин Ю. П., Соболев С. И. Высокотемпературные электропечи с графитовыми элементами. М., «Энергия», 1974. 102 с.
5. Ерохин А. А. Плазменно-дуговая плавка металлов и сплавов. М., «Наука», 1975. 188 с.
6. Заборонок Г. Ф. и др. Электронная плавка металлов. М., «Металлургия», 1972. 350 с.
7. Лейканд М. С. Вакуумные электрические печи. М., «Энергия», 1968. 328 с.
8. Лейканд М. С., Мальтер В. Л., Матковский К. А. Вакуумнокомпресссионные электрические печи. М., «Энергия», 1971. 88 с.
9. Макарычев И. И., Кондратьев А. И. Сверхвысоковакуумные электрические печи сопротивления. М., «Энергия», 1975. 96 с.
10. Мармер Э. Н., Гурвич О. С., Мальцева Л. Ф. Высокотемпературные материалы. М., «Металлургия», 1967. 215 с.
11. Мармер Э. Н. Углерафитовые материалы (справочник). М., «Металлургия», 1973. 135 с.
12. Мармер Э. Н., Ферштер Л. М. Расчет и проектирование вакуумных систем электропечей. М., Госэнергоиздат, 1960. 99 с.
13. Мурованная С. Г. Закалка сталей в вакууме. М., «Машиностроение», 1974. 28 с.
14. Никольский Л. Е. и др. Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры. М., «Энергия», 1971, 128 с.
15. Смелянский М. Я. и др. Электронные плавильные печи. М., «Энергия», 1971. 167 с.
16. Фомин В. М., Слободской А. П. Вакуумные печи сопротивления с экранной теплоизоляцией. М., «Энергия», 1970. 95 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
<b>Введение</b> . . . . .	3
Принципы устройства основных видов вакуумных электропечей . . . . .	5
Некоторые требования к вакуумным печам . . . . .	20
Материалы вакуумных электропечей . . . . .	23
Тепловая изоляция вакуумных печей сопротивления . . . . .	26
Нагревательные элементы вакуумных печей сопротивления . . . . .	23
Конструкции садочных вакуумных печей сопротивления . . . . .	34
Вакуумные электропечи сопротивления непрерывного действия . . . . .	45
Вопросы для самопроверки . . . . .	50
Список литературы . . . . .	51

---