



ИНДУКЦИОННЫЕ
ПЕЧИ
ДЛЯ ПЛАВКИ
ЧУГУНА

ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ ЧУГУНА



Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1976

Авторы: Борис Павлович **Платонов**, Анатолий Дмитриевич **Акименко**, Саша Максимовна **Богуцкая**, Евгений Митрофанович **Китаев**, Юрий Борисович **Платонов**, Алексей Анатольевич **Скворцов**.

Рецензент канд. техн. наук **Г. П. Дологов**

Индукционные печи для плавки чугуна. М., «Машиностроение», 1976. 176 с.

В книге описаны применение и конструкции индукционных печей для плавки чугуна в литейных цехах машиностроительных предприятий; особое внимание уделено способам изоляции и футеровки, рассмотрены металлургические процессы, протекающие в индукционных печах, энергетический и материальный балансы и особенности энергоиспользования, а также технико-экономические особенности выплавки чугуна в индукционных печах.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занятых в области индукционной плавки чугуна.

Табл. 69, ил. 86, список лит. 41 назв.

▼

ПРЕДИСЛОВИЕ

Перспективные планы развития народного хозяйства СССР предусматривают значительный рост всех отраслей промышленности. Важнейшей составляющей машиностроительной продукции являются чугунные отливки (около 80% общей массы отливок), поэтому развитие и совершенствование чугунолитейного производства остается в ряду важнейших задач машиностроения.

Один из путей повышения качества чугуна — это усовершенствование процессов плавки, от которых зависит улучшение структуры и свойств чугуна.

Традиционный метод выплавки чугуна в вагранках имеет следующие недостатки: сравнительно высокая стоимость шихтовых материалов, загрязнение атмосферного воздуха и др.

Известны многочисленные способы улучшения ваграночного процесса. Например, устаревшие вагранки оборудуют установками для подогрева дутья или их заменяют вагранками закрытого типа; это приводит к увеличению капитальных затрат, усложняет эксплуатацию, но не устраняет недостатки ваграночного процесса.

Индукционные печи для плавки чугуна имеют следующие преимущества: возможность использования любых отходов черных металлов; снижение угара и брака; улучшение механических свойств чугуна и др. В связи с основной задачей повышения качества продукции, стоящей перед народным хозяйством СССР, вопрос широкого внедрения индукционных печей для плавки чугуна приобретает большую актуальность.

Преимущественное распространение индукционных печей промышленной частоты обусловлено простотой конструкции, достаточно высоким к. п. д. и отсутствием необходимости в установке специальных преобразователей.

Основной предпосылкой для широкого развития индукционных печей явилось значительное увеличение мощности электростанций и выработки электрической энергии в СССР. Повышенная энергоемкость процесса индукционной плавки обуславливает необходимость изучения методов снижения удельных расходов электрической энергии при выплавке металлов в индукционных печах. В связи с этим в книге большое внимание уделяется тепловым балансам печей и их энергетическим характеристикам.

Принципиальным вопросом является повышение качества чугуна индукционной плавки по сравнению с ваграночным. Вопросы эти подробно рассмотрены в гл. IV.

Широкое внедрение в производство индукционных печей требует повышения квалификации обслуживающего персонала. При этом возникает необходимость в обобщении отечественного опыта работы индукционных плавильных печей для плавки чугуна. Такое обобщение и является целью настоящей книги. В ней использованы результаты длительной эксплуатации индукционных печей для плавки чугуна на одном из машиностроительных заводов страны. В частности, детально рассмотрены вопросы усовершенствования электроизоляции и теплозащиты индукторов печей.

Учитывая новизну темы и неизбежность в этих условиях отдельных упущений, авторы заранее благодарны за все замечания и пожелания, которые просят направлять по адресу: 107078, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3. Издательство «Машиностроение».

Гл. I написана С. М. Богуцкой и А. Д. Акименко; гл. II — С. М. Богуцкой; гл. III — Б. П. Платоновым; гл. IV — Ю. Б. Платоновым; гл. V — А. А. Скворцовым и Е. М. Китаевым; гл. VI — А. Д. Акименко и Ю. Б. Платоновым; гл. VII — А. А. Скворцовым и А. Д. Акименко.

ВВЕДЕНИЕ

Применение индукционных печей вместо вагранок коренным образом меняет технологию плавки чугуна. В связи с этим возникает необходимость в более подробном рассмотрении особенностей индукционной плавки.

При переходе на плавку в индукционных печах изменяется состав потребляемой шихты. Вместо доменного чугуна в состав шихты входят легковесные низкокачественные материалы (обрезь, чугунная и стальная стружка, легковесный стальной лом и др.). Применение более дешевой шихты дает ощутимый экономический эффект, величина которого может колебаться в значительных пределах в зависимости от многих, часто взаимоисключающих факторов. Можно считать, что разница между себестоимостями жидкого чугуна, полученного в вагранках и в индукционных печах, составляет 10—30 р. на 1 т при подсчете по существующим отпускным ценам.

Перевод на плавку в индукционных печах приводит к улучшению показателей плавильных агрегатов. По данным производственного объединения Автогаз, возможно понижение угара по отношению к металлозавалке с 6—8 до 2—3% и увеличение выхода годного литья с 60 до 72%. Необходимо также отметить улучшение качества чугуна, получаемого в индукционных печах, по сравнению с ваграночным, что имеет большое значение для народного хозяйства в целом, так как создает предпосылки для уменьшения толщины стенок отливок и увеличения долговечности машиностроительных деталей. Индукционные печи обладают и другими преимуществами. Интенсивное перемешивание расплавленного металла в печах промышленной частоты обеспечивает равномерное распределение температур и химического состава ванны по объему. Принципиальная схема электропитания и конструкции печей наиболее приспособлены для автоматического регулирования температуры по сравнению с другими плавильными агрегатами.

Важным преимуществом индукционных печей является также резкое сокращение загрязнения воздушного бассейна отходящими газами, особенно в тех случаях, когда промышленные предприятия находятся в непосредственной близости от жилых районов.

Естественно, что плавильные индукционные печи имеют свои особенности, усложняющие их внедрение и эксплуатацию. При проектировании новых установок необходимо тщательно выяснить возможности их энергоснабжения как по потреблению, так и по максимуму нагрузки, а также возможности обеспечения установок стальным ломом.

Индукционные печи — это, по существу, агрегаты периодического действия, у которых рабочий процесс сопровождается неизбежными простоями, что значительно повышает удельные расходы энергетической энергии. При номинальном удельном расходе 550 кВт·ч/т фактические удельные расходы из-за простоев и разогревов «зумфа»¹ обычно составляют 600—700 кВт·ч/т. В таких условиях создание технологических режимов, обеспечивающих наименьшие удельные расходы, становится делом первостепенной важности.

Большие осложнения возникают также при эксплуатации индукционных печей из-за недостаточной стойкости футеровки. В книге приведены подробные данные о результатах работы по разработке отечественных огнеупоров для индукционных тигельных печей.

В соответствии с выполняемыми функциями установлены следующие границы применения тигельных и канальных печей: тигельные печи используют в качестве первичных плавильных агрегатов для непосредственного получения жидкого чугуна или в условиях дуплекс-процесса; канальные же печи работают в качестве накопителей металла совместно с индукционными плавильными печами или вагранками. Необходимо отметить, что при небольших производительностях установок применяют канальные плавильные печи специальной конструкции.

Развитие индукционной плавки в СССР стало возможным в результате создания отечественных конструкций индукционных печей. По проектам ВНИИЭТО изготавливаются плавильные индукционные печи емкостью до 25 т. Предполагается выпуск индукционных печей для чугунолитейных цехов с большими емкостями и производительностями. На ряде заводов СССР установлены зарубежные индукционные печи аналогичных конструкций.

В СССР индукционные установки для плавки чугуна используют в автомобильной, судостроительной, металлургической и других отраслях промышленности. Широкое распространение они получают на заводах «Центролит» Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности, где их применяют для самостоятельного получения чугуна и для получения чугуна в условиях дуплекс-процесса. Преимущественно устанавливают печи ИЧТ-6 и ИЧТ-10. В связи с намеченным строительством новых литейных цехов предполагается установка тигельных печей большей производительности с канальными печами в качестве

¹ Здесь и далее «зумфом» называется остаток жидкого металла в печи.

накопителей металла. В ближайшем будущем предполагается ввести в эксплуатацию не менее 500 индукционных печей для плавки чугуна.

Наибольшее распространение индукционная плавка чугуна получила в США, где число установок примерно в 2,5 раза больше, чем в Западной Европе, и количество литейного чугуна, выплавляемого в индукционных печах, превышает 40%.

В Западной Европе максимальное развитие индукционные чугуноплавильные печи получили в ФРГ, где выплавляется 75—80% чугуна на этих печах, остальные 20—25% выплавляют в Англии, Франции, Италии, Швеции и других странах. Выплавка чугуна в индукционных печах неуклонно возрастает. Например, в ФРГ она достигла 20% по выплавке и 27% по количеству установленных агрегатов.

Большинство находящихся в эксплуатации печей имеют емкость до 10 т, что является результатом замены устаревших вагранок малой производительности. Такое положение в какой-то мере характерно и для отечественных чугунолитейных цехов.

Характерно увеличение количества и емкости канальных печей, используемых для дуплекс-процесса. Так, в США и Англии применяют канальные печи емкостью до 225—270 т. Представляют интерес опубликованные данные о работе в ФРГ индукционных плавильных печей в дуплекс-процессе в комплексе с доменными печами небольшой производительности (три печи по 400 м³ каждая), а также с мартеновскими печами.

На развитие индукционной плавки за границей оказывает большое внимание экономическая конъюнктура. Например, существенная разница между дневным и ночным тарифами на электрическую энергию заставляет в ряде случаев переводить плавильные агрегаты на работу преимущественно в ночную смену. В Швеции наблюдается большой разрыв между стоимостями шихты для вагранок и для индукционных печей (соответственно 171 и 112 крон на 1 т). Это обстоятельство явилось одной из причин относительно широкого развития индукционной плавки в Швеции.

Глава I

КОНСТРУКЦИИ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЛАВКИ ЧУГУНА

1. ТИГЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Для плавки чугуна широко применяют индукционные тигельные печи промышленной частоты, в качестве печей-накопителей — каналынные печи (табл. 1, 2). На основе имеющихся данных можно установить следующие параметры тигельных печей для плавки чугуна:

Емкость тигля, т	1—32
Установленная мощность трансформаторов, кВт·А	360—7000
Производительность, т/ч	0,6—12

Указанные емкости и производительности не предельны, известны случаи использования печей емкостью 65 т и более.

1. Характеристика отечественных плавильных электрпечей типа ИЧТ (рабочая температура 1400°C, частота тока 50 Гц)

Тип печи	Емкость тигля, т	Мощность установлен- ная одной пе- чи, кВт·А	Мощность электрпечи, кВт	Номинальная производи- тельность печи, т/ч	Удельный рас- ход электро- энергии, кВт·ч/т	Расход охлаж- дающей воды на одну печь, м³/ч	Напряжение на индукто- ре, В	Масса, т	
								металло- конструк- ций одной печи	печи с рас- плавлен- ным ме- таллом
ИЧТ-1	1,0	360	357	0,56	638	4,5	500	4,8	7,3
ИЧТ-2,5	2,5	1300	687	1,23	585	8,0	1052	11,5	17,0
ИЧТ-6	6,0	1300	1190	2,26	547	13,0	1143	17,0	28,0
ИЧТ-10	10,0	2500	2180	4,2	542	28,0	1074	-	40,96
ИЧТ-25	25,0	6300	4650	9,2	540	51,0	1710	42,0	87,0

Изменение установленной мощности N_0 в зависимости от номинальной емкости печи G показано на рис. 1, из которого следует, что отношение $\frac{N_0}{G}$ уменьшается в среднем на 30—200 кВт/т при увеличении G . Удельные расходы электрической энергии меняются при этом пропорционально отношению $\frac{N_0}{G}$ (подробно см. гл. V). Значительное понижение удельного расхода электрн-

2. Индукционные тигельные печи промышленной частоты некоторых зарубежных фирм

Фирма, страна и тип печи	Емкость тигля, т	Установленная мощность, кВт	Производитель- ность при плавке до 1450°C, т/ч	Расход электроэнер- гии, кВт·ч/т
BBC (Швейцария —ФРГ)				
6/1100	6,0	1100	2,22	500
12/1000	12,6	1000	1,8	550
31,5	31,5	7100	10,9	520
ASEA (Швеция)				
LFD-12	12,0	1700 кВт·А	3,4	550
LFD-25	25,0	5200 кВт·А	2,7	530
Япония				
6,0	6,0	1650 кВт·А	2,64	505
12,0	12,0	2800 кВт·А	4,65	485
A25	25,0	2700	5,2	—
ALCO (Англия)				
6,0	6,0	1200	2,43	560
10,0	10,0	1800	3,0	560
20,0	20,0	3000	5,0	550

ческой энергии является одной из причин устойчивой тенденции к увеличению производительности индукционных печей.

Конструктивно тигельные печи по способам направления магнитного потока на наружной стороне индуктора могут быть разделены следующим образом. В печах закрытого типа магнитный поток проходит по магнитопроводам, изготовленным из трансформаторной стали. В этом случае почти весь паружный поток проходит через магнитопроводы, что обеспечивает минимальные

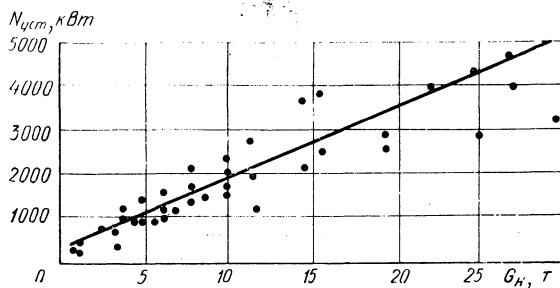


Рис. 1. Зависимость установленной мощности $N_{уст}$ от емкости индукционных печей

потери в корпусе. В печах открытого типа магнитный поток проходит только по воздуху. Применяют также экранированные конструкции, у которых магнитный поток проходит по воздуху, а остальные детали защищаются от нагрева медным экраном. Печи открытой конструкции обычно небольшой емкости и для плавки чугуна их почти не используют. Применяют их иногда для плавки высококачественной стали и цветных металлов. Тигельные печи средней и большой емкости выполняют только закрытого типа.

Как указывалось выше, печи промышленной частоты просты по устройству и имеют достаточно высокий к. п. д., чем обуславливается преимущественное распространение их в чугунолитейных цехах. Конструктивное выполнение тигельных плавильных печей промышленной частоты зависит от специфических условий производства. На рис. 2 для примера показаны возможные конструктивные решения, связанные со способами разливки жидкого чугуна.

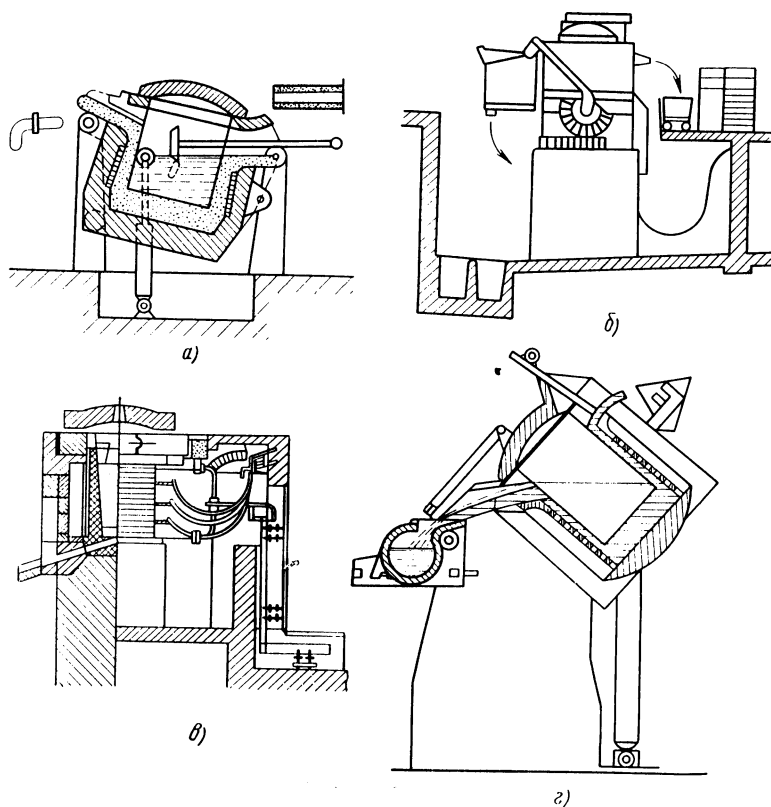


Рис. 2. Конструктивные разновидности индукционных тигельных печей промышленной частоты:

а — с двумя желобами; б — наклоняющаяся на две противоположные стороны; в — с выпускной леткой в нижней части; г — с непрерывной разливкой металла

Общие принципы и устройство индукционных тигельных печей предполагаются известными читателю [2, 4, 31]. В книге рассмотрены конструктивные особенности индукционных тигельных печей на примере агрегатов, результаты исследований которых приведены ниже.

Основные конструктивные узлы для плавильных печей емкостью 12 и 6 т приведены на рис. 3, 4. Как видно из этих рисунков, индукционная печь состоит из следующих узлов: сварного стального корпуса 1, пакетов магнитопроводов 2, водоохлаждаемого индуктора 3, огнеупорного тигля 4, гидравлического механизма наклона печи 5, крышки 6, печи с подъемным механизмом, шлангов системы охлаждения 7, изоляции индуктора и сигнализатора прогорания тигля 8. В комплект печи входят батарея конденсаторов, трансформаторы и пульт управления. Кроме того, их оборудуют симметрирующим устройством и приборами для измерения температуры (см. гл. VI).

Сварной стальной корпус печи представляет собой стальную конструкцию, укрепленную на фундаменте, которая объединяет отдельные узлы и детали печи (рис. 5). Материал корпуса — углеродистая сталь.

Магнитопроводы (рис. 6) уменьшают электромагнитное поле рассеивания, предохраняют металлические конструкции от перегрева, а также являются элементами жесткости конструкции, расположенными по периметру индуктора. Пакеты магнитопроводов изготовляют из трансформаторной стали. Электрические потери в них не превышают 1% номинальной мощности печи.

Водоохлаждаемые индукторы являются главным рабочим органом индукционной печи. Их изготовляют из полых медных трубок в виде многовитковой спирали. Профиль и сечение медных трубок должны обеспечивать прохождение необходимого для охлаждения количества воды, а также минимум электрических потерь. Наиболее часто используемые профили трубок показаны на рис. 7. При изготовлении индуктора необходимо обеспечивать параллельность витков в горизонтальной плоскости, зазоры между которыми должны сохраняться постоянными в течение всей кампании печи. При этом должны точно соблюдаться геометрическая форма и размеры индуктора.

Крепление витков индуктора между собой можно выполнять в каждом отдельном случае по-разному. Особое внимание заслуживает метод крепления витков с помощью промежуточной изоляции. Существуют следующие способы изоляции: с помощью межвитковых прокладок с последующим их стягиванием специальными стойками; монолитная жаростойкая бетонная или полимерная изоляция и др. (подробно см. п. 4).

Индуктор часто охлаждается секционно. В этом случае вход и выход охлаждающей воды происходят самостоятельно в каждой из секций, из которых состоит индуктор (см. рис. 8). Секционное охлаждение обеспечивает необходимую пропускную способ-

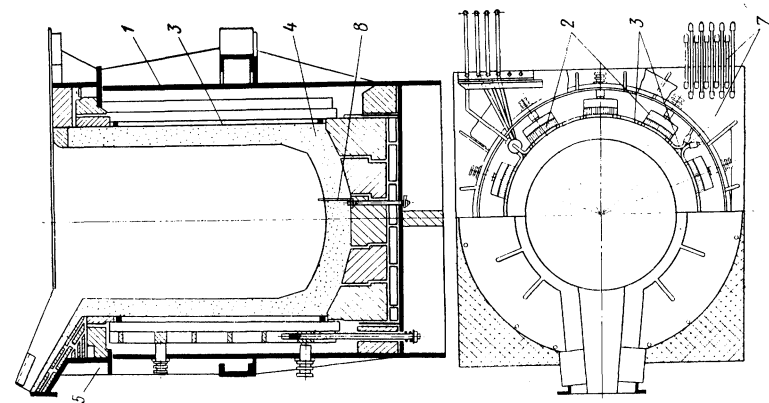


Рис. 3. Индукционная тигельная печь емкостью 12 т промышленной частоты (со снятой крышкой)

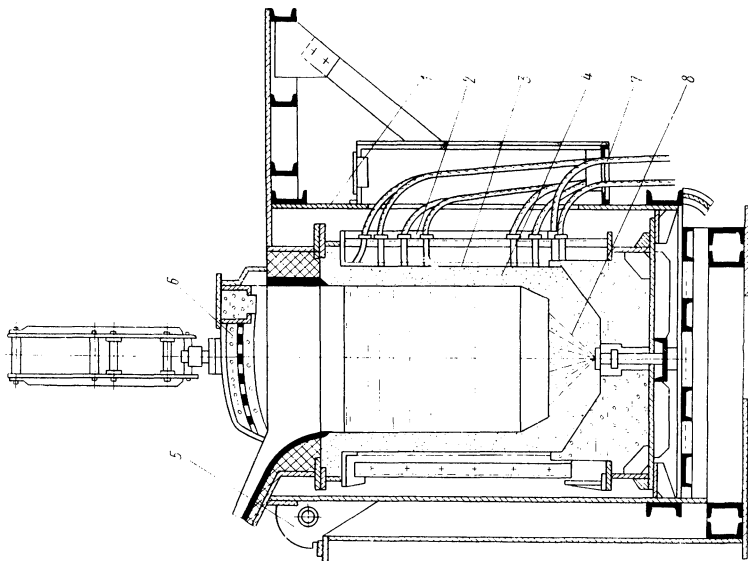


Рис. 4. Индукционная тигельная печь ИЧТ-6

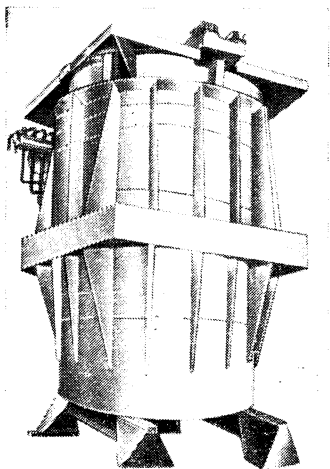


Рис. 5. Металлический кар-
кас индукционной печи

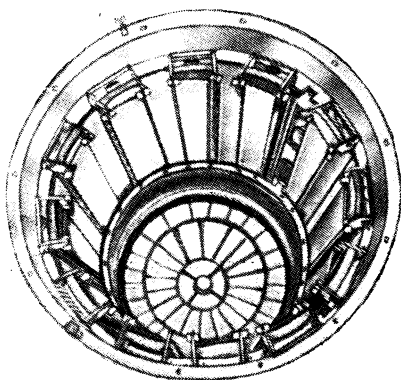


Рис. 6. Установка магнитопроводов индукцион-
ной печи (без верхней половины металличе-
ского шаблона)

ность при небольшом начальном давлении охлаждающей воды; секционирование электропитания при этом не обязательно.

Стабильная длительная работа тигля обуславливает нормальную эксплуатацию индукционного плавильного агрегата в целом. Наибольшее распространение получили футерованные тигли. Металлическими и графитовыми тиглями оборудуют печи малой мощности. Геометрические размеры тигля определяются соотношением внутреннего диаметра к высоте, обычно равным 0,6—1,0. Набивные тигли, как правило, имеют кислую и нейтральную футеровки, основная футеровка встречается редко. Большинство индукционных плавильных печей оборудуют кварцевой футеровкой, обладающей максимальной стойкостью к кислым шлакам. От выбора футеровки зависит нормальная эксплуатация печи (см. гл. II).

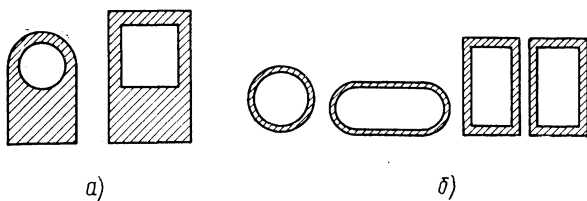


Рис. 7. Профилированные сечения медных трубок,
применяемых для изготовления индукторов:
а — неравностенные трубки; б — профилированные и не-
профилированные трубки

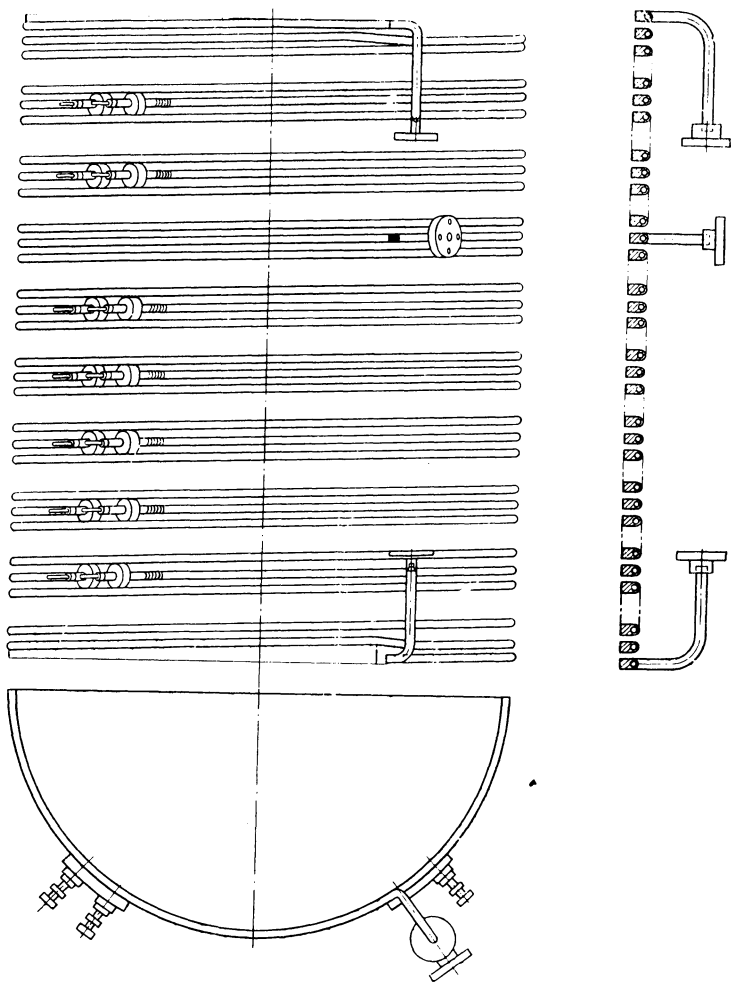


Рис. 8. Секционное охлаждение индуктора

При разливке металла печи поворачиваются вокруг неподвижной оси на $90-100^\circ$ гидравлическим механизмом наклона. Ось наклона проходит в непосредственной близости к сливному носку. Гидравлические цилиндры с плунжером, связанные с каркасом печи, расположены по обе стороны печи. Необходимое давление обеспечивается насосной установкой.

Крышки индукционных печей уменьшают потери теплоты излучением и предохраняют окружающее оборудование от перегрева. Конструкция их должна обеспечивать длительную сохранность теплоты при частых открываниях-закрываниях. Крышки изготовляют футерованными с внутренней стороны в двух конструктив-

ных вариантах — поворотном и откидном.

Подвод тока к индуктору печей средней и повышенной мощности осуществляется при помощи одного или нескольких токоведущих кабелей. Разъемные токоведущие соединения с подвижными контактами ставят только на печах малой мощности.

Сигнализатор проедания тигля является необходимой частью конструкции тигельных печей. Он служит для предотвращения аварий в случае разъедания футеровки и проникновения расплавленного металла к индуктору. Принцип действия этого устройства основан на изменении проводимости чувствительного элемента при его нагревании от расплавленного металла в зоне возможного проедания футеровки (см. гл. II).

На индукционных плавильных печах промышленной частоты для ведения контроля плавки по периодам устанавливают электронные взвешивающие устройства — прессдукторы с указанием массы на световом указателе. Кроме того, изменения массы тигля во времени фиксируется на ленте записывающего приспособления. Такими приборами укомплектованы индукционные печи емкостью 12 и 25 т промышленной частоты, установленные на Автогазе.

Взвешивающая система, принципиальная схема которой показана на рис. 9, состоит из мессдозы с датчиком 1, стабилизатора напряжения 2, питающего узла с секцией питания и выпрямления 3, контрольного прибора 4, состоящего из калиброванного устройства и предельного индуктора указываю-

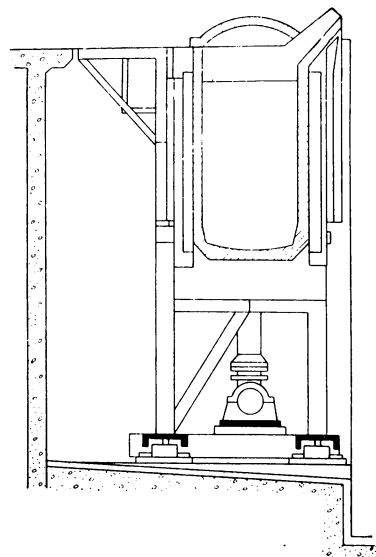


Рис. 9. Принципиальная схема взвешивающего устройства (прессдуктора) индукционной печи емкостью 12 т

Рис. 10. Установка индукционной тигельной печи на датчики взвешивающего устройства

щих приборов 5. Установка действующей плавильной печи на датчики взвешивающего устройства показана на рис. 10.

2. КАНАЛЬНЫЕ ПЕЧИ

В качестве печей-накопителей (миксеров) в чугунолитейных цехах обычно используют каналные печи промышленной частоты. Канальные печи служат для хранения жидкого металла (выдержки), перегрева его (максимально на 100°С выше режимного), введения добавок в случае необходимости. В табл. 3 дана номенклатура отечественных каналных печей типа ИЧКМ, применяемых для этой цели, а в табл. 4 — характеристика печей по-

3. Канальные индукционные печи

Тип	Емкость, т	Мощность, кВт	Производительность, т/ч
ИЧКМ-6	6	300	7,6
ИЧКМ-10	10	300	7,0
ИЧКМ-16	16	400	10,0
ИЧКМ-25	25	600	15,0
ИЧКМ-40	40	900	22,0
ИЧКМ-60	60	—	—

4. Миксерные каналные печи

Полезная емкость, т	Мощность, кВт		Емкость печи, т			Наибольшая скорость слива, т/мин	Производительность по перегреву от 1400 до 1500°С при полностью заполненной печи, т/ч
	Номинальная	Выдержки, 1500°С и полностью заполненной печи	Полная	Зумпф	Резерв		
45	2200	580	67	22	7	7,5	65
30	1400	360	42	12	4	4,5	42

лезной мощностью 30—45 т фирмы ASEA, установленных в чугунолитейных цехах предприятий для выдержки и перегрева чугуна [27]. Намечается тенденция к увеличению емкостей каналных печей в США, например, есть печи емкостью 120 и 270 т.

Канальные печи в последнее время нашли широкое применение в Советском Союзе и за рубежом. Это объясняется тем, что в них можно получать чугун высокого качества. Кроме того, перегрев чугуна свыше 1300°С обходится значительно дешевле, чем в других плавильных агрегатах. Имея одну плавильную установку, в каналных печах можно получать чугуны различных марок путем введения легирующих добавок. Для установки каналных печей требуются значительные затраты, в первую очередь, на монтаж фундаментов и мостовых кранов большой грузоподъемности.

Индуктор печи построен на принципе трансформатора, в котором первичной обмоткой являются втулки катушки индуктора, а вторичной — короткозамкнутый виток расплавленного металла в канале. Канал соединен с ванной (рабочим объемом в печи). Токи, индуцируемые в витке, нагревают металл и создают условия для циркуляции расплавленной среды в замкнутом контуре. Циркуляционные потоки возникают из-за того, что температура металла в канале выше, чем в рабочем объеме ванны. По этой

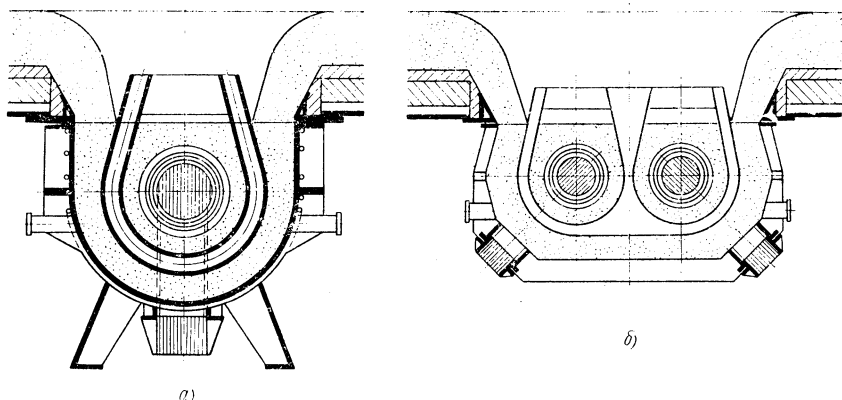


Рис. 11. Схема установки канальных блоков к печам:
а — с одним U-образным каналом; б — с двумя U-образными каналами

причине срок службы футеровки в канале меньше срока службы футеровки в ванне. Первые канальные печи небольшой производительности изготовляли с открытым желобом, наполненным расплавленным металлом. Современные печи выпускают только в закрытом исполнении.

По расположению каналов канальные печи разделяют на вертикальные и горизонтальные. В принципе возможно также наклонное расположение каналов (рис. 11, 12). Печи с вертикальными каналами более удобны в эксплуатации, так как их легче очищать при ремонте. В агрегатах повышенной производительности возможна установка двух и более параллельных каналов. Применение же горизонтальных каналов снижает ферродинамическое давление в них. Это улучшает условия работы футеровки, однако снижает скорость конвективных потоков и температуру в канале.

По конфигурации рабочего объема канальные агрегаты могут быть разделены на печи с цилиндрическими и с барабанными ваннами. Последними оборудуют печи с горизонтальной осью. Барабанные печи по сравнению с цилиндрическими имеют следующие преимущества; упрощенный механизм поворота, сниженные тепловые потери и др. Барабанные печи получили широкое рас-

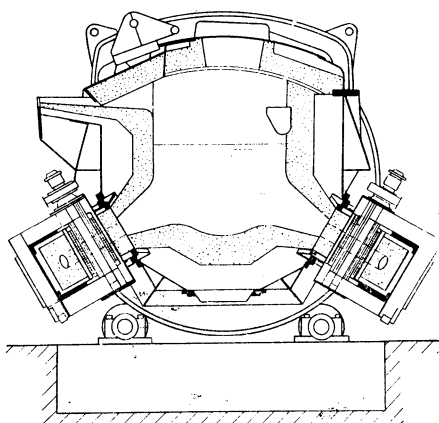


Рис. 12. Канальная печь для выдержки чугуна с двумя взаимозаменяемыми индукторами

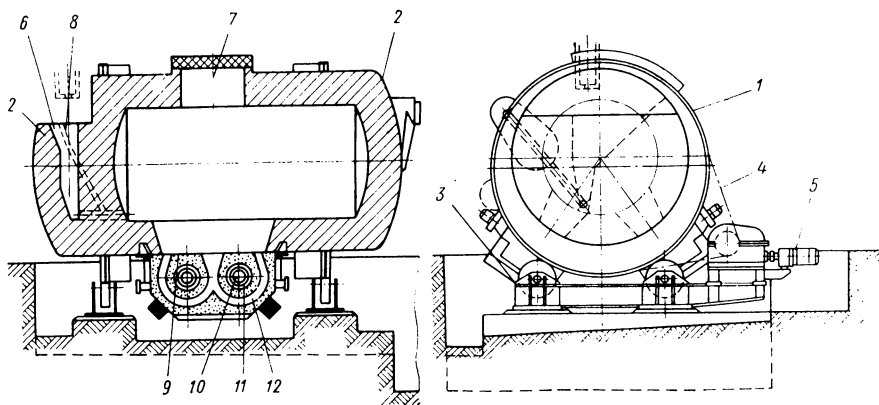


Рис. 13. Канальная печь барабанного типа

пространение, в частности, они установлены в литейном цехе Автогаза.

Барабанная печь (рис. 13) представляет собой сварной цилиндр 1 с двумя лобовыми стенками 2, которые являются несущими элементами печи. Для поворота печи предусмотрены приводные ролики 3. Барабан поворачивается при помощи цепной передачи 4 и двухскоростного асинхронного двигателя 5 с пластинчатыми тормозами. В футеровке лобовых стенок выполнены сифоны 6 для заливки металла. Сифон почти полностью исключает возможность проникновения шлака и окисляющего воздуха в ванну печи. Отверстия 7 предназначены для загрузки присадок и скачивания небольших количеств шлака. Отверстия закрываются специальными крышками. Футеровка стенки состоит из наружного слоя, который выкладывают термонзоляционным кирпичом, и из нескольких рядов шамотного кирпича. Рабочая часть ванны набивается огнеупорной массой по металлическому шаблону. В лобовых стенках имеются каналы 8 для выпуска металла, отбора проб и замера температуры.

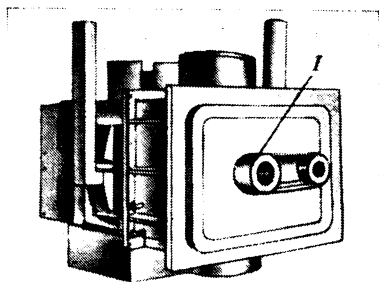


Рис. 14. Канальный блок для печи барабанного типа

Канальный блок представляет собой индуктор печи, снабженный сердечником 10 с первичными обмотками 11, который окружен одним или двумя U-образными каналами 12. Каналы выполнены в монолитной футеровке 7. Канальный блок изображен на рис. 14, где показаны металлические мунштуки 1, с помощью которых канальный блок 9 (см. рис. 13) присоединяется к ванне печи в нижней части цилиндра [17].

Футеровочные материалы обладают высокой огнеупорностью, отличаются незначительным коэффициентом расширения и имеют нейтральные свойства, обеспечивающие высокую химическую стойкость. Для образования канала заданной формы применяют металлический шаблон, расплавляющийся при первой плавке. Вокруг шаблона набивается или заливается с применением вибрации огнеупорная масса. Первичная катушка индуктора заключена в металлический корпус. Обмотка катушки пропитана жаростойким лаком, изолирована стеклолентой и выдерживает нагрев до 250°C . Катушка с сердечником охлаждается воздухом, а корпус канального блока имеет систему водоохлаждения. Для сушки и спекания футеровки каналов в канальный блок вмонтировано сопротивление, которое нагревается от специального трансформатора мощностью 70 кВт. Футеровка канального блока сушится в течение 24—28 ч до установки его на печь при температуре $150\text{—}300^{\circ}\text{C}$.

Широкое распространение для накопления жидкого чугуна канальные печи получили только после разработки приставных взаимозаменяемых канальных блоков. Взаимозаменяемость стала возможной после решения проблемы надежности шва в стыке канального блока с печной ванной путем охлаждения шва, применения специальных конструкций и монолитных огнеупоров, предохраняющих шов от проникновения в него металла.

В условиях эксплуатации канальные блоки заменяют без полного освобождения печи от металла, а лишь путем освобождения каналов заменяемого блока от металла соответствующим поворотом печи. Конструктивно канальный блок выполнен так, что при наличии крана или кран-балки его легко заменить за несколько часов. При замене канального блока для облегчения отделения его от ванны температуру металла в каналах повышают для расплавления шлака, отложившегося на стыковых соединениях.

Установка канальных блоков в нижней части барабана под углом 45° к вертикальной оси облегчает замену блоков, уменьшает ферростатическое давление на стенки канала и повышает долговечность футеровки. Во избежание тепловой перегрузки и интенсивного износа футеровки мощность индуктора одного канального блока должна быть не более 1100 кВт. Повышение мощности печи в целом достигается увеличением числа канальных блоков. Для наклона печи служат два гидравлических цилиндра с двумя скоростями. В установке предусмотрен командный аппарат для двухскоростного управления наклоном печи и два масляных насоса.

Представляют интерес данные по полезно потребляемой мощности для перегрева чугуна и выдержки, приведенные в табл. 5 [27].

Определяя расчетным путем полезную мощность, необходи-

мую для перегрева чугуна и мощность, теряемую в результате потерь теплоты, можно оценить необходимую мощность индукторов.

5. Полезная мощность канальных миксерных печей, кВт

Номинальная емкость, т	Мощность индукторов, кВт						
	300	400	500	700	1100	2...700	2...1100

Максимальная полезная мощность, подводимая к ванне

30	125	210	310	485	795	1060	—
45	105	185	285	460	770	1035	1650

Мощность выдержки при 1500°C

30	105	175	175	195	275	295	—
45	—	130	200	220	300	320	480

3. КОМПОНОВКА ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

Плавильный тигельный индукционный агрегат промышленной частоты состоит из следующих узлов:

1) собственно печи с фундаментом, поворотным устройством, крышкой и др.;

2) электрической части (трансформатора, симметрирующего устройства, конденсаторной батареи, пульта управления, токоподводящих приспособлений и др.);

3) системы водоснабжения (подводящих и сливных трубопроводов, насосных установок, баков и др.);

4) вентиляционной установки (вентиляторов, воздухопроводов, фильтров и др.);

5) приборов теплового контроля и автоматики.

Такие же узлы используют в установках с канальными печами. Габаритные размеры, мощность и типы применяемого при этом оборудования соответственно меняются.

Анализ имеющихся данных по компоновке установок, в которых используются тигельные плавильные печи, дает следующие результаты: удельная площадь, приходящаяся на 1 т номинальной емкости, колеблется в пределах от 70 м²/т для печей емкостью 700 кг и до 40—55 м²/т для печей емкостью 30 000 кг; из всей площади около 45% занимает вспомогательное оборудование (трансформаторы, конденсаторная батарея, вентиляторы, фильтры и др.). Для канальных печей номинальной емкостью 40 т занимаемая удельная площадь составляет ~ 30 м²/т без вспомогательного оборудования.

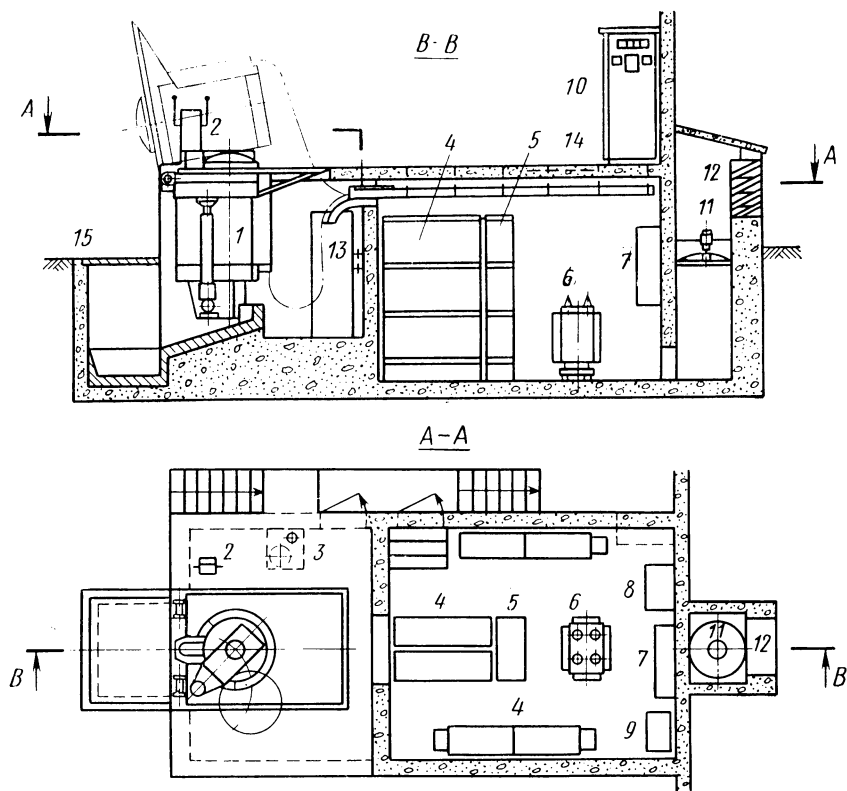


Рис. 15. Расположение установки индукционных печей промышленной частоты

Схема расположения основных составляющих плавильной установки с тигельными индукционными печами приведена на рис. 15. В ее состав входят: индукционная плавильная печь с крышкой 1; пульт управления наклоном печи и открыванием крышки 2; насосная 3 в отдельном помещении, обслуживающая гидропривод; конденсаторная батарея 4; симметрирующая батарея 5 и симметрирующий дроссель 6. Электрическая часть выделяется в отдельное помещение, обычно расположенное под полом цеха, где помимо перечисленных узлов находится коммутационная аппаратура главного тока 7, пусковое приспособление 8 и трансформатор 9. Главный пульт 10 со всей контрольной и пуско-регулирующей аппаратурой должен быть расположен на одной отметке с печью в отдельном помещении, из которого можно наблюдать за рабочей площадкой. Вентиляционная установка располагается в специальном помещении, в котором помещаются вентилятор 11, воздушный фильтр 12 и другое оборудование. На рис. 15 также показаны отметка пола 15 литейного цеха, монтажный проем 14 и трубопроводы охлаждающей воды 13.

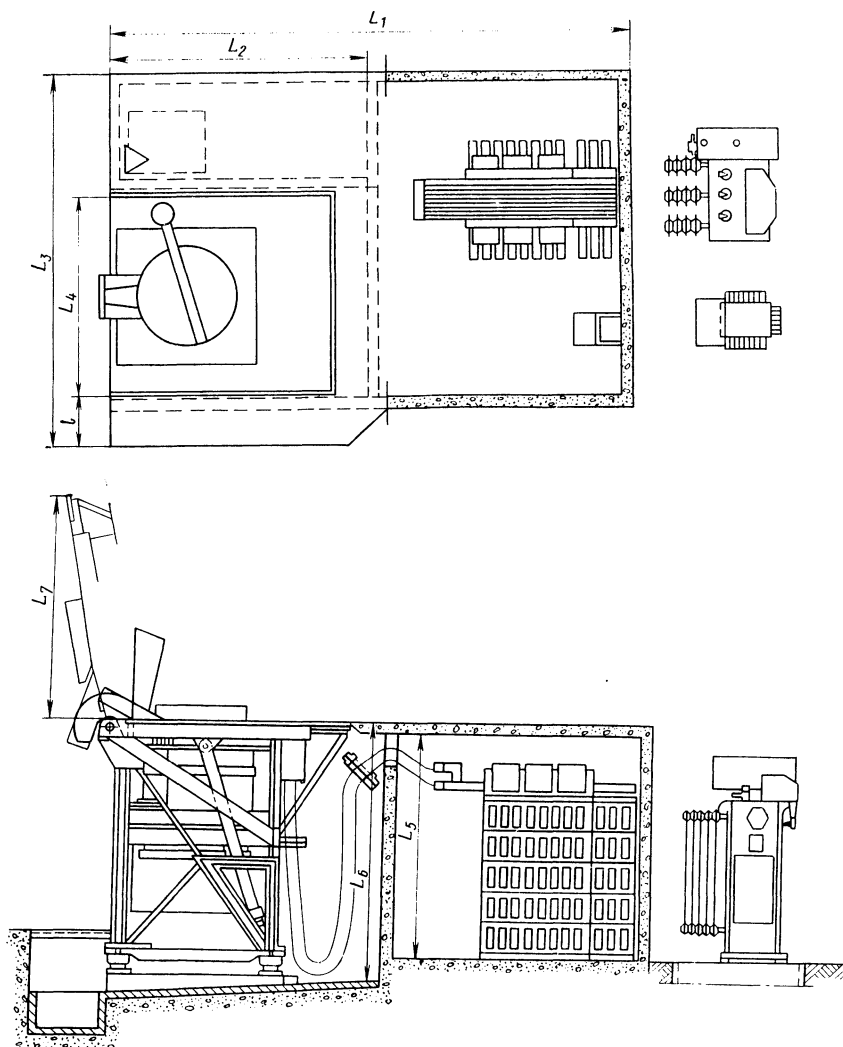


Рис. 16. Расположение плавильной индукционной установки промышленной частоты (ASEA, Швеция) (см. табл. 1– 6)

Возможны и другие решения по компоновке. На рис. 16 показана типовая схема установки тигельных печей, рекомендуемая фирмой ASEA, основные габаритные размеры для каждого типоразмера даны в табл. 6.

На рис. 17 показана плавильная установка, состоящая из двух индукционных тигельных печей емкостью 12 т и одной печи емкостью 6 т. Печи смонтированы на металлической платформе, отметка которой составляет 2 м по отношению к уровню пола

6. Габаритные размеры индукционных тигельных установок для плавки чугуна, мм (рис. 16)

Емкость, т	Мощность, кВт	Занимаемая площадь, м ²	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇
1,5	400	22	5000	2900	4000	2280	2500	3000	2300
3	600	27	6700	3200	4100	2360	2750	3100	2700
5	900	32	7200	3600	4500	2720	3250	3250	3000
8	1300	38	8000	3900	4800	3030	3250	3750	3400
12	1800	45	8600	4200	5200	3400	3750	4100	3700
18	2500	64	11400	4700	5600	3680	4300	4650	4200
23	3500	78	11000	4900	7100	4000	4300	5000	4600

чугунолитейного цеха. На рисунке можно видеть металлические шаблоны, предназначенные для набивки футеровки.

Миксерные каналные печи располагают обычно на уровне пола цеха. При этом компоновка приобретает свои особенности, в частности, помещение для электрооборудования и насосные располагаются на большем расстоянии от агрегата, чем в случае тигельных печей. Создание типовой компоновки затруднено, так как расположение агрегатов зависит от общей компоновки цеха. На рис. 18 показан один из вариантов компоновки.



Рис. 17. Плавильный участок с двумя печами промышленной частоты емкостью 12 и 6 т

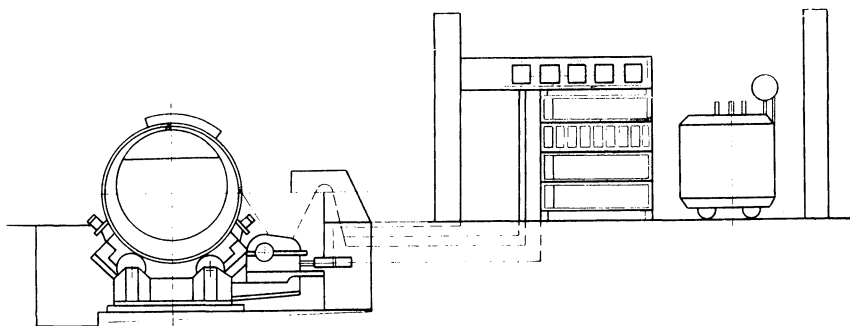


Рис. 18. Компоновка индукционной каналной печи

4. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ИНДУКТОРОВ

При конструировании и эксплуатации индукционных тигельных печей особое внимание уделяется обеспечению нормальной работы индукторов, поэтому вопросы электрической изоляции должны быть рассмотрены более подробно.

Индуктор печи отделен от расплава стенкой тигля с небольшим слоем тепловой изоляции, в качестве которой применяют листовой асбест, стеклоткань или миканит. С увеличением толщины этого слоя уменьшаются тепловые потери через стенку печи и обеспечивается безопасность ее эксплуатации, однако понижается к. п. д. печи. Применение изоляции большей толщины приводит к повышенным потерям энергии, при этом происходит перегрев набивной футеровки, ее ускоренное и глубокое спекание, что вызывает трещинообразование футеровки. Если изоляция небольшой толщины, увеличиваются тепловые потери и создаются предпосылки для неблагоприятной кинетики процесса спекания. В обоих случаях существенно снижается стойкость тигля. Следовательно, толщину изоляции необходимо выбирать, исходя из условия сохранения достаточно высокого электрического и теплового к. п. д. [1].

Изоляция тигельной индукционной печи служит защитой для медной катушки индуктора от теплоты тигля и регулирует теплоперепад при определенной толщине стенок тигля (управляет спеканием тигля).

Изоляция индуктора образует выравнивающий слой между растущим тиглем и неподвижным индуктором, создавая скользкую поверхность для термически расширяющегося материала тигля относительно жестко закрепленного индуктора. Изоляция является также электрической защитой находящегося под напряжением индуктора по отношению к тиглю и уменьшает возможность прорыва расплавленного металла через футеровку и прикосновение его к индуктору. Кроме того, изоляция предохраняет

медные трубки и остальные части конструкции печи от воздействия высоких температур. Температура расплава в индукционной тигельной печи может достигать 1450—1550° С, температура охлаждающей воды в медных трубах индуктора не должна превышать 50—60° С, поэтому материалы изоляции могут нагреваться до температуры 150—200° С.

В индукционной тигельной печи обеспечивается электрическая изоляция кондуктора, предотвращающая пробой между расплавом и катушкой, а также между витками индуктора, и тепловая изоляция индуктора (листовой асбест).

Во всех случаях при изоляции индукторов индукционных тигельных печей используют оба вида изоляции. Особенности эксплуатации электрической изоляции индукционных тигельных печей обуславливают требования, предъявляемые к материалам изоляции. К ним относятся в первую очередь высокая механическая стойкость и повышенные электрические свойства при вибрациях 50 Гц и температурах до 250° С. Электрическая прочность материалов изоляции должна выдерживать не менее $2U + 1000$ кВ, где U — напряжение, подводимое к индуктору.

Электрическая изоляция индуктора может быть следующих видов: воздушная изоляция между витками индуктора; лаковая изоляция витков (табл. 7); обмоточная изоляция витков (табл. 8); прокладка из изоляционных твердых материалов между витками (табл. 8); монолитная изоляция витков индуктора.

7. Электроизоляционные лаки и эмали

Электроизоляционный материал	Теплостойкость по Мартенсу, °С	Удельное объемное сопротивление, не менее, Ом·см	Минимально допустимая электрическая прочность при $f=50$ Гц
Лаки:	Кратковременно до 250		
ЭФ-5Т или КО-946		1×10^{14}	6
К-44	200	1×10^{13}	28
К-47 или КО-947	200	1×10^{15}	30
К-55 или КО-921	250	1×10^{13}	25
КО-87	300	1×10^{14}	20
КО-88 и КО-89	500	1×10^{13}	10
К-65	250	1×10^{14}	10
Эмаль КО-911	250	1×10^{13}	10

При монолитном способе изоляции индуктора применяют следующие материалы: полиэфирные и эпоксидные смолы, отвердители и катализаторы этих смол, наполнители — асбомука, квар-

8. Изоляционные материалы индукционных тепловых печей

Материал	Марки наиболее часто применяемых материалов	Разрывная нагрузка на 30 мм ширины, кгс	Предел прочности, кгс/см ²	Удельное объемное сопротивление, Ом·см	Пробивное напряжение при 50 Гц, не менее, кВ
----------	---	---	---------------------------------------	--	--

Обмоточная изоляция

Стеклоткань	ДСК, СЭ	110	6	$1 \cdot 10^{11}$	4,5
Стеклолента	8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	18-23	—	—	
Асболенга	50	—	—	—	
Асбестовая ткань	АТ-3	—	—	—	

Изоляционные прокладки

Текстолит	А, ВЧ	—	600	$1 \cdot 10^{10}$	6,0
Асбоцементная прокладка	—	—	570	$1 \cdot 10^{10}$	6,0
Стеклотекстолит	СТК-41	—	1800	$1 \cdot 10^{13}$	18

цевая мука, каолин, а в качестве герметизирующих материалов — силиконовые герметики. При заформовке индуктора в жаропрочный бетон применяют высокоглиноземистый цемент, корунд и другие керамические материалы.

В табл. 9 приведены физико-механические и диэлектрические свойства применяемых на практике полимерных материалов.

5. СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИНДУКТОРОВ

Для изготовления изоляции любым из рассмотренных выше способов необходимы специальные помещения с температурой воздуха не ниже 15°С, имеющие приточно-вытяжную вентиляцию или специально оборудованные участки в плавильном цехе. Вблизи от рабочего места не должно быть станков для механической обработки металлов или других источников металлической пыли, так как попадание ее в исходные материалы ухудшает диэлектрические свойства изоляции.

При обмоточном и монолитном способах изоляции индуктора на участке необходимо иметь следующее оборудование: вытяжной шкаф с весами, смеситель для приготовления компаунда или пропиточного лака и термошкаф для подогрева материалов и обя-

9. Физико-механические и диэлектрические свойства и рецептурный состав полимерных материалов для изоляции индукторов

Полимерные материалы и их состав [частей по массе]	Физико-механические свойства					Диэлектрические свойства	
	Предел прочности при сжатии, кгс/см ²	Предел прочности при статическом изгибе, кгс/см ²	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·с·°C)	Сопротивление изоляции при 110°C R _М	Электрическая прочность образцов при 10 кВ
1. Межвитковая изоляция, состав: ЭД-5—100, ДБФ—15, ПЕПА—12, ПК-100; смола ПН-3—100, гипериз—6, НК—8, ПК—100; смола ПН-3—100, гипериз—1, НК—8, перекись бензонла—1, демитиланилин—1, асбомука—120; смола ПН-3—100, гипериз—3, НК—8, асбомука—120; ПН-3—100, гипериз—6, ПК—6, асбомука—100; ПН-11—100, гипериз—6, НК—8, смола, асбомука—80	2040 1620	740 1080	$20,4 \times 10^{-6}$ $12,1 \times 10^{-6}$	80 190	0,53 0,61	3000 1200	Не выдерживает Выдерживает
2. Пропиточный состав: ПН-3—100, гипериз—6, НК—4	1710 1590 1740 1790	1001 1200 1213 1218	$17,2 \times 10^{-5}$ $18,1 \times 10^{-6}$ $17,1 \times 10^{-6}$ $14,7 \times 10^{-6}$	200 210 220 100	0,64 0,54 0,61 0,52	1800 1800 1800 1800	То же " " "
3. Внутренний слой: ВГО-1—1, смола Т111—100, смола Л-20—100	2008	1480	$11,0 \times 10^{-6}$	250	0,26	5000	"
4. Внешняя изоляция: паста полиэфирная, стеклоткань, асбюткань, пропиточная смола	2116	2400	$11,0 \times 10^{-6}$	450	0,32	10000	"
	2100	2470	$15,2 \times 10^{-6}$	200	0,38	910	"

зательного прокаливания стеклоткани или стеклоленты. При переработке полимерных материалов, применяемых для изоляции, требуются точная дозировка и тщательное выполнение технологии их приготовления. Лица, выполняющие работы по изоляции индукторов, должны быть ознакомлены с правилами безопасности работы с полимерными материалами.

Прежде чем приступить к выполнению изоляции, проводят следующие подготовительные работы: катушку индуктора отжигают, протравливают кислотой и испытывают на предельное напряжение, поверхность витков индуктора визуально проверяют на отсутствие раковин, вмятин и отверстий, затем все трубки рихтуют и выравнивают параллельно одна относительно другой. Одновременно должны быть проверены соединения концевых витков (они должны прилегать по всей поверхности). Ниже рассмотрен каждый из применяемых способов изоляции индукторов тигельных печей.

Воздушная изоляция. При такой изоляции зазор между витками индуктора фиксируется промежуточными прокладками или гребешками текстолитовой стяжной стойки. Зазоры между витками составляют обычно 1,5—2,0 см. Этот вид изоляции применяют для печей малой емкости, работающих при низких напряжениях. Между катушкой индуктора и керамическим тиглем устанавливают листовой асбест или миканит.

Прокладочная изоляция индукторов. Такой способ применяют в случае, если зазоры между витками меньше 1,0 см, при этом используют прокладки из изолирующих твердых листовых материалов или изолируют стекло- и асболентами. Для установки прокладок необходимы стяжные приспособления, фиксирующие геометрическое соотношение размеров индуктора. В качестве тепловой изоляции используют листовой асбест или миканит.

Лаковая изоляция. При использовании воздушной заслонки и изолирующих прокладок часто витки индуктора покрывают дополнительно электроизоляционными лаками (табл. 9). Технология покрытия проста и доступна каждому предприятию. Подготовленный к изоляции индуктор обезжиривают растворителем — ксилолом, ацетоном, уайтспиритом или др. Затем на медные витки кистью или распылителем наносится первый слой изоляционного лака и выдерживается на воздухе. По истечении 1 ч наносится второй слой лака и выдерживается в течение 8—12 ч на воздухе. Толщина покрытия двух слоев составляет 0,1 мм, а в случае применения эмалей — до 1 мм.

Обмоточная изоляция индуктора. На отечественных печах широко применяют обмоточную изоляцию витков индуктора, выполняемую в следующей последовательности: наносят слой электроизоляционного лака, обматывают витки стекло- или асболентами и пропитывают электроизоляционным лаком.

Катушку индуктора по описанному выше способу покрывают двумя слоями электроизоляционного лака и просушивают

на воздухе в течение 8—12 ч. Затем на специальном устройстве или на трубе катушку растягивают и подвешивают параллельно оси индуктора с шагом между витками, удобным для выполнения обмотки. Двое рабочих обматывают витки катушки индуктора стеклолентой шириной 20—30 мм. Обмотка выполняется таким образом, чтобы в любом сечении получалось два слоя стеклоленты. После окончания обмотки индуктор стягивают и пропитывают лаком с последующей сушкой его на воздухе в течение 12—16 ч. При таком варианте изоляции необходима дополнительная подготовка и правка катушки индуктора, а также установка между изолированными витками трех или четырех изоляционных прокладок на одинаковом расстоянии одна от другой по периметру. После этого катушку индуктора стягивают стяжными стойками или болтами. Существенными недостатками такой изоляции является трудоемкость изготовления, невозможность соблюдения стабильного зазора между витками и обеспечения гладкой внутренней и наружной поверхности индуктора, а также то обстоятельство, что при работе узел индуктора теряет свою жесткость от вибраций. В случае же прорыва металла и прожога трубки почти всегда требуется демонтаж индуктора с полной заменой изоляции (рис. 19).

Монолитная изоляция индукторов. В последнее время в индукционных тигельных печах используют индукторы монолитной кон-

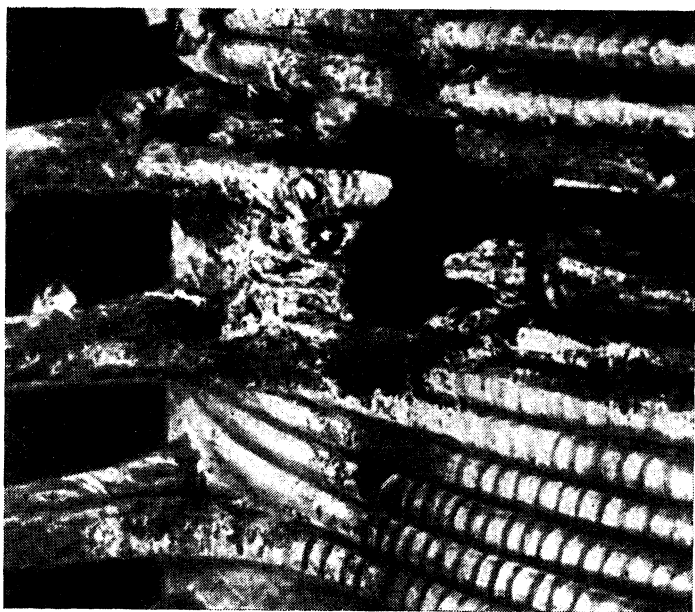


Рис. 19. Вид индуктора с обмоточной изоляцией после прорыва металла через изоляцию и трубки индуктора

струкции. Такой индуктор представляет собой катушку, покрытую электроизоляционным лаком и имеющую электрическую изоляцию между витками в виде твердой полимерной или бетонной массы, которая образует монолит с витками индуктора. В этом случае возникает необходимость использования стяжных болтов и стоек; обеспечивается стабильность всех геометрических размеров индуктора и, что самое главное, значительно уменьшается амплитуда смещения при вибрации. При ремонтах тигля и повторных футеровках не требуется демонтаж индуктора. Для монолитной изоляции применяют жаропрочный бетон и эпоксидные и полиэфирные компаунды в сочетании со стеклотканями и ленточными. Технология выполнения зависит от применяемых материалов [31]. Материалом монолитной изоляции служит бетон на высокоглиноземистом цементе с корундовым наполнителем (до 93% Al_2O_3).

Индуктор для изоляции помещают в деревянную разъемную форму в виде двух полуцилиндров. Приготовленный по рецепту бетон заливают в пространство между индуктором и формой. После затвердевания бетона форму снимают, а забетонированный индуктор подвергают термовлажностной обработке. Индукторы с бетонной изоляцией имеют невысокую стойкость — пять-восемь плавов, после этого бетон растрескивается, появляется множество микротрещин, в результате образуются «мосты проводимости» и возможны электрические пробоя. Кроме того, бетон гигроскопичен, и конденсатная вода немедленно им впитывается, что может приводить к аварийной остановке печи. По мнению авторов, более целесообразно применение полимерной изоляции.

Монолитная изоляция индуктора полимерными компаундами более приспособлена к особенностям конструкции индукционных печей и тяжелым условиям работы, чем бетонная. Она представляет собой комбинированную многослойную изоляцию, состоящую из наружного межвиткового (комбинированного) и внутреннего теплостойкого слоев.

На рис. 20 показан схематичный разрез индуктора, из которого видно расположение отдельных слоев. Межвитковая изоляция создает монолит, который прочно склеивается с витками индуктора. Наружный слой в этом случае является как бы стягивающим, что

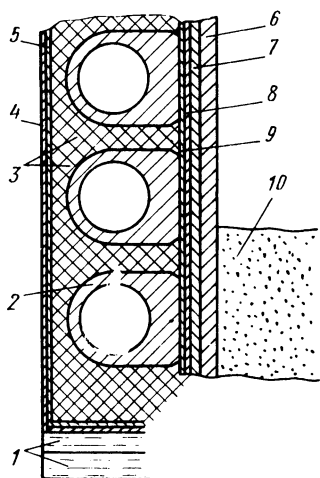


Рис. 20. Схема расположения слоев в монолитной изоляции индуктора:

1 — прокладка; 2 — покрытие двумя слоями эмаль КО-911; 3 — межвитковая изоляция; 4 — асбошланг; 5 — стеклоткань; 6 — листовой асбест; 7 — micaлит; 8 — стеклоткань, пропитанная Т-111; 9 — герметик; 10 — футеровка

уменьшает потери теплоты всей установки. Внутренний слой защищает индуктор от возможного соприкосновения с расплавом при аварийных прорывах металла.

Заливочный и шпаклевочный компаунд для межвитковой изоляции готовится на основе эпоксидной полиэфирной или кремний-органической смолы с соответствующими ускорителями, отвердителем и наполнителем. В качестве наполнителя могут быть использованы кварцевая мука, маршалит, асбестовая мука, стеклянная мука и др. Свойства заливочного компаунда должны удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к изоляции индукторов, в том числе иметь электрическую прочность не менее 10 кВ/мм и теплостойкость до 150—200° С. Свойства внутреннего слоя — теплостойкого экрана должны соответствовать этим же условиям, но теплостойкость должна быть выше 200—350° С. Внутреннюю изоляцию выполняют из электронизоляционной стеклоткани, пропитанной смолами типа Т-111, К-65, Т-10, стойкими к высоким температурам, и органосиликатными материалами типа ВН-30, В-58, И-5, Т-11 и др. Внутренний слой изоляции и межвитковая изоляция составляют единое целое.

Недостатком этого метода является увеличение толщины изоляции между тиглем и индуктором, что ведет к уменьшению буферного слоя футеровки. При монолитной изоляции нет выхода для воды, выделяющейся при спекании тигля из футеровки, что для больших печей не безопасно.

Материалы, применяемые для монолитной изоляции, токсичны в период нанесения, поэтому помещение, где проводится эта работа, должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией.

Монолитный способ изоляции освоен сравнительно недавно и в литературе почти не освещен. Этим обуславливается целесообразность подробного рассмотрения технологии изготовления монолитно изолированного индуктора, разработанной на Автогазе.

Монолитная изоляция (рис. 20) состоит из лакового покрытия витков, выполненного электроизоляционной коррозионно-стойкой эмалью КО-911 с отвердителем полиэтиленполиамидом, межвитковой изоляции, представляющей собой полиэфирный компаунд (100 частей по массе полиэфирной смолы ПН-3, 6 частей по массе нафтената кобальта и 6 частей по массе гидроперексидбензила). В качестве наполнителя применена асбестовая мука мелкого помола (асбест 7) в количестве 100 частей по массе.

Внутренняя изоляция — теплостойкий экран состоит из силиконового герметика ВГО-1, стеклоткани СЭ и смолы Т-111 с отвердителем Л-20. Листовые асбест и миканит составляют тепловую изоляцию индуктора. Оформляющий наружный слой состоит из полиэфирного компаунда со стеклотканью и асботканью, приформованных к компаунду по всему периметру. Технология изготовления сводится к приготовлению полиэфирного компаунда, раскрою стеклоткани и асботкани и непосредственно к формовке

индуктора. При этом необходимо следующее оборудование: растягивающий шаблон, кантователь, смеситель, шпирц для заполнения межвиткового пространства полиэфирным компаундом. В качестве инструмента используют ножницы, шпатели, кисти.

Компаунд можно готовить в металлической или полиэтиленовой емкости. Расчетные количества смолы ПН-3 и асбомуки тщательно перемещать до получения однородной массы. Затем добавить расчетное количество гидроперекисибензила, перемешать и непосредственно перед употреблением добавить требуемое количество ускорителя НК и опять тщательно перемешать. Живучесть композиции 1—2 ч в зависимости от температуры окружающего воздуха.

Состав для теплостойкого экрана готовят из смолы Т-111 (100 частей по массе) и низкомолекулярной полиамидной смолы Л-20 (50 частей по массе). Оба компонента должны быть тщательно перемешаны и в течение 1 ч использованы.

После выполнения всех подготовительных работ индуктор устанавливают в специальное приспособление — кантователь (рис. 21). Затем медную поверхность индуктора обезжиривают и наносят первый слой грунтовочного лака или эмали. В соответствии с разработанной технологией наносят слой антикоррозионной эмали КО-911. Перед употреблением в эмаль КО-911 вводят отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА) в количестве двух частей по массе из 100 частей по массе КО-911. Толщина слоя 0,05—0,08 мм. Эмали дают высохнуть в течение 1 ч на воздухе при температуре 20°C, затем наносят второй слой этой же эмали и выдерживают на воздухе 24 ч. Три нижних и три верхних витка катушки индуктора обматывают одним слоем стеклотенты шириной 25—30 мм с перекрытием в 1/2 ширины. Ленту пропитывают составом пропиточного компаунда. Перед тем как заполнить полиэфирным компаундом межвитковое пространство и покрыть наружную поверхность индуктора, следует

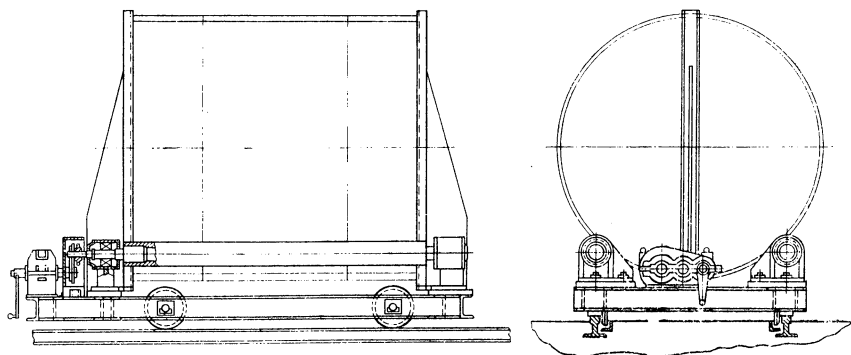


Рис. 21. Стенд для кантования и ремонта индукторов тигельных печей

выверить соосность катушки последнего и отрегулировать ее таким образом, чтобы диаметр, высота и расстояние между витками соответствовали чертежным размерам. Необходимо также проверить цилиндричность катушки, правильность установки зажимов и других крепежных деталей.

Внутреннюю поверхность индуктора покрывают полиамидной пленкой и плотно прижимают при помощи распора и листа фанеры. Пространство между витками катушки и наружной частью заполняют полиэфирным компаундом при помощи шпателя или специального шприца (рис. 22). Компаунд надо наносить так,

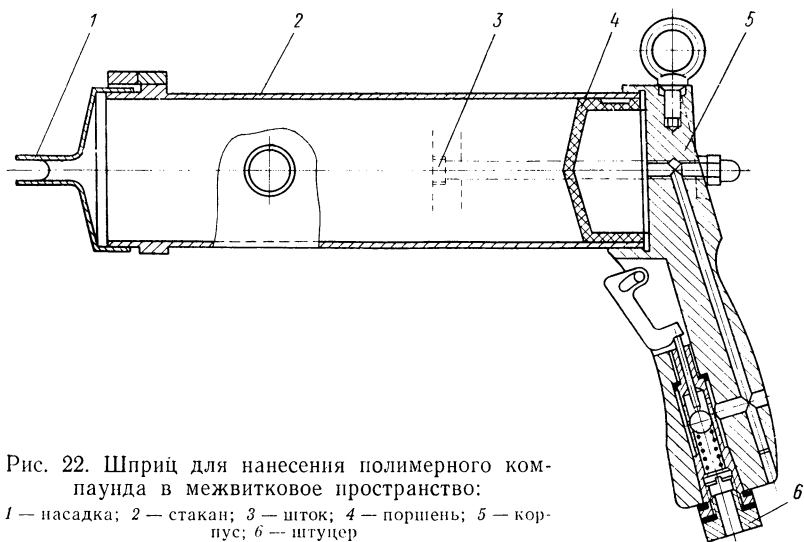


Рис. 22. Шприц для нанесения полимерного компаунда в межвитковое пространство:

1 — насадка; 2 — стакан; 3 — шток; 4 — поршень; 5 — корпус; 6 — штуцер

чтобы толщина слоя на поверхности витков была 5—8 мм. Метод нанесения компаунда шприцем показан на рис. 23.

Через 1—1,5 ч после окончания предыдущей операции начинается «желатинизация» компаунда. Вдоль индуктора по всей высоте на компаунд накладывают стеклоткань, предварительно прогретую при температуре 150° С в течение 1—2 ч, при этом не должно быть перекрытия слоев в осевом направлении. Затем стеклоткань пропитывают пропиточной композицией при помощи жесткой кисти. Полимеризуясь вместе с компаундом, стеклоткань составляет с ним монолитный слой. После полного затвердевания приклеивают слой асботкани перпендикулярно к продольной оси индуктора. Асботкань должна прикрывать наружную часть индуктора и выступать на 20 мм над нижним его концом. Для приклеивания асботкани используют пропиточный полиэфирный или эпоксидный компаунд.

После окончательной обклейки индуктора с наружной стороны с его внутренней стороны снимают полиамидную пленку,



Рис. 23. Нанесение полимерного компаунда в пространство между витками катушки индуктора

лист фанеры и распорки и внутреннюю поверхность тщательно осматривают. При обнаружении раковин или неровностей на внутренней поверхности катушки их заделывают полиэфирным компаундом. При этом необходимо учесть, что толщина полиэфирного компаунда на внутренней стороне витков должна быть не более 0,3 мм. Разрешается оставлять компаунд только в том случае, если слой его настолько тонок, что виден слой эмали, нанесенный на трубки индуктора. Если толщина слоя компаунда больше, то его следует удалить. Ни в коем случае не разрешается заполнять полиэфирным компаундом неровности между витками катушки.

Изолированный таким образом индуктор следует оставить при комнатной температуре для полного отвердевания компаунда на 24 ч. В случае необходимости время отвердевания можно сократить, пропуская через трубки индуктора воду. При этом следует учесть, что горячая вода, если ее подать сразу после нанесения компаунда, может вызвать тепловое расширение материала, в результате чего возможно появление трещин. Рекомендуется следующий режим подогрева: через катушку пропускать холодную воду, затем постепенно температуру воды повышать до 80°C , при этой температуре выдерживать не менее 2 ч. Скорость повышения температуры воды не должна превышать $25^{\circ}\text{C}/\text{ч}$.

Термозащитный экран или внутренний слой изоляции индуктора можно заполнять в кантователе или после монтажа индуктора. Для этого стеклоткань СЭ (толщиной не более 0,2 мм) нарезают кусочками шириной $1/3$ основной ширины ткани. Затем на внутреннюю поверхность индуктора сверху вниз кистью наносят слой ПС-11 и сразу же шпателем слой силиконового гер-

мстика ВГО-1 шириной, соответствующей ширине нарезанной стеклоткани. Не более чем через 10 мин полосы стеклоткани наклеивают на герметик ВГО-1, стеклоткань должна покрывать низ и верх катушки. Таким образом слой герметика ВГО-1 и стеклоткани наносят на всю внутреннюю поверхность индуктора. После окончания этой операции, по истечении 15—20 мин, твердой кистью наносят на стеклоткань слой смолы Т-111 с отвердителем Л-20. После окончания указанных работ выдержка на воздухе до полного отверждения всех компонентов изоляции должна составлять не менее 48 ч.

Полностью изолированный индуктор испытывают межвитковой пробой, после чего определяют сопротивление изоляции относительно заземленных конструкций. Изолированный индуктор устанавливают в печь, зажимают магнитопроводами и до начала футеровки определяют сопротивление изоляции относительно земли, которое должно быть не менее 5 мОм. Затем набивают футеровку тигля, просушивают ее и до спекания еще раз определяют сопротивление изоляции футерованного индуктора относительно земли, которое должно составлять не менее 4 мОм.

Монолитно изолированные индукторы без ремонта могут работать 2—3 года, причем при повторных футеровках не требуется демонтаж индуктора из печи.

Для тепловой изоляции индуктора, как было указано, применяют листовой асбест определенной толщины. Толщина асбестового листа зависит от общей толщины футеровки, рабочей температуры выплаваемого металла, а также от емкости печи и материала футеровки. От толщины асбестовой изоляции в большой степени зависит процесс спекания тигля. Чем тоньше асбестовая изоляция, тем больше протяженность неспеченной зоны футеровки, поэтому на некоторых печах асбестовый картон заменяют двумя-тремя слоями стекловолокна.

После кампании примерно в 250 плавов удалось замерить толщину асбестовой изоляции, которая уменьшилась на 30—40%. Причиной этого, по-видимому, являются большие радиальные силы, возникающие в индукторе в процессе эксплуатации.

Асбестовые листы монтируют вручную, специальные металлические зажимные кольца поддерживают асбестовые листы по всей высоте и обеспечивают постоянную температуру индуктора. В последнее время некоторые зарубежные фирмы для тепловой изоляции индуктора применяют фекипольцилиндры [39], которые представляют собой заранее изготовленные цилиндры из асбестовых листов, причем они так прочно склеены, что допускают транспортировку, хранение и монтаж в течение длительного времени с момента их изготовления.

Глава II

ФУТЕРОВКА ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЛАВКИ ЧУГУНА

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Назначение футеровки тиглей сводится к защите индуктора и образованию емкости для плавки металла. Огнеупорный тигель в индукционной печи наиболее ответственный узел, от стойкости и надежности которого зависит работа установки [37].

Большинство индукционных тигельных печей имеет набивную кварцевую футеровку. Нейтральную футеровку в основном применяют в канальных печах [40].

На рис. 24 показана зависимость термического расширения футеровочных материалов MgO (99%), SiO_2 (98%) и Al_2O_3 (94%) от температуры. Как видно из этих данных, кварцевая футеровка расширяется при температуре до $570^\circ C$, что важно для эксплуатации тиглей. В индукционных тигельных печах расплавы металлов, будучи нагретыми до $1450\text{—}1550^\circ C$, оказывают на футеровку термическое, коррозионное и эрозионное воздействия.

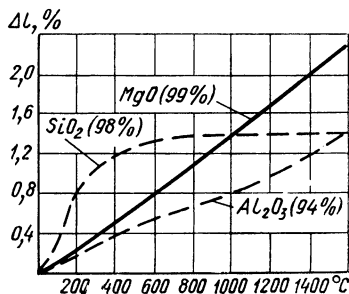


Рис. 24. Термическое расширение некоторых футеровочных материалов в зависимости от температуры

Контактная поверхность тигля нагревается практически до температуры жидкого металла. Следующие за ней зоны из-за малой теплопроводности и наличия водяного охлаждения нагреваются до более низких температур, поэтому по толщине стенки тигля создается температурный градиент, достигающий на некоторых участках $300^\circ C/cm$. Наличие значительного температурного градиента улучшает условия спекания набивной футеровочной массы по толщине стенки.

Огнеупорная футеровка индукционной печи состоит из нескольких частей (рис. 25), основными из которых являются стенки тигля 3 и подины печи 2. Подина выполнена из фасонного шамотного кирпича с плотной подгонкой кирпичей (рис. 26). Верх тигля 4 также выполняют из фасонного шамотного кирпича (см. рис. 25). Футеровку сливного желоба 5 выполняют непосредственно перед началом спекания тигля. Для контроля состояния огнеупорной футеровки печи устанавливают сигнализатор 1 проедания тигля, принцип действия и конструкции которого рассмотрены ниже.

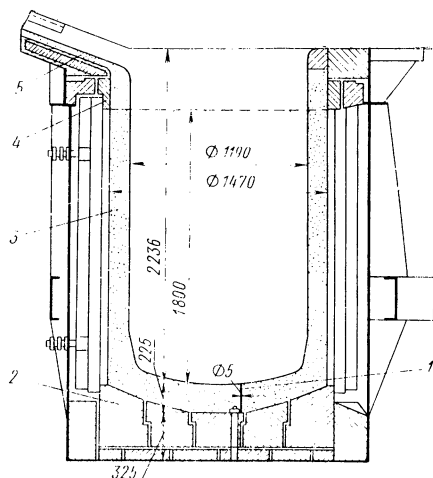


Рис. 25. Футеровка индукционной тигельной печи

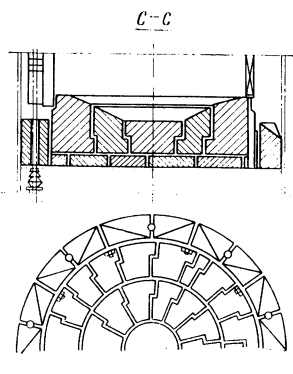


Рис. 26. Футеровка подины индукционной печи, выполненная фасонным кирпичом

Материалы и устройства футеровки выбирают в зависимости от назначения печи, а также от марки, химического состава и температуры выплаваемого металла. При выборе материалов для огнеупорной футеровки необходимо учитывать следующие требования. Футеровочные материалы должны быть химически инертны к компонентам выплаваемого металла и шлака, обладать стабильностью объема и устойчивостью против растрескивания, а также должны иметь высокую огнеупорность и термостойкость. В спеченном состоянии футеровка должна быть стойкой к коррозии и эрозии в условиях интенсивного перемешивания расплава. Достаточная механическая прочность необходима для обеспечения устойчивости при больших напряжениях, возникающих в результате многократной смены температур.

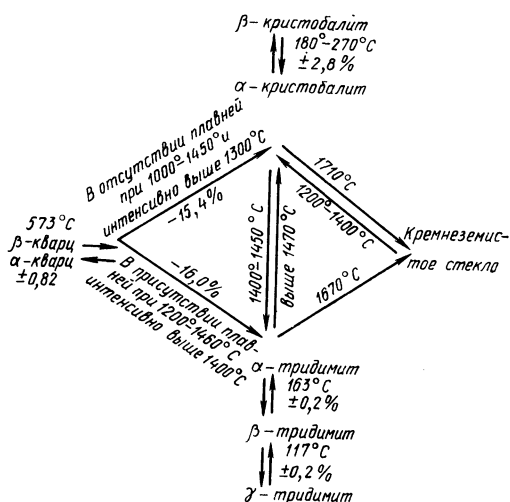
2. КИСЛАЯ ФУТЕРОВКА

Наибольшее распространение для индукционных печей получила кислая футеровка на основе кварцита с химической связкой из борной кислоты или борного ангидрида. За рубежом широко применяют скальные кварциты смешанной и слоистой структур. В отечественной практике для футеровки индукционных печей применяют кварциты: овручские (Украина) и первоуральские (свердловская область); отходы мартеновского динаса Первоуральского динасового завода; кварцевые пески Аниксийского карьера Литовской ССР, Карельские кварциты и др. В табл. 10 приведены химические составы наиболее часто встречающихся кислых футеровочных масс.

10. Химический состав отечественных и зарубежных кислых футеровок
индукционных печей, %

Масса	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Первоуральский кварцит . .	98,1	0,59	0,31	0,79	—
Овручский кварцит	98,2	1,41	0,1	0,06	0,09
Шихта мартеновского днаса	97,08	1,42	0,23	0,36	0,53
Карельский кварцит место- рождения Метчангярви . . .	98,28	0,62	0,32	0,08	—
Кварцевый песок Аникий- ского карьера	99,0	0,42	0,2	0,2	Следы
HF-4	98—99	0,5—1,0	0,4—0,6	0,1	0,9
SS	97,0	1,4	0,2	0,5	—
HD	96,9	0,3	0,2	0,5	1,0
Роданит LFD	97,52	0,89	0,37	0,18	0,1
Сурацит	96,4	0,8	0,3	0,8	—

Существует несколько модификаций кремнезема, образующихся в результате превращений, происходящих при изменении термодинамических условий. Характер превращений кремнезема виден на рис. 27.



Все существующие модификации можно (условно) разбить на три группы:

I — группа: α-кварцит, β-кварц;

II группа: α-тридимит, β-тридимит, γ-тридимит;

III группа: α-кристобалит, β-кристобалит.

Взаимные переходы одной группы в другую даже в неустойчивых областях совершаются очень медленно. Превращения же внутри отдельных групп происходят почти мгновенно при достижении температуры

Рис. 27. Схема перехода различных модификаций кремнезема

перехода. Эти превращения сопровождаются резкими изменениями удельных объемов и коэффициентов термического расширения (табл. 11) [28].

11. Полиморфные превращения кварцита

Модификация	Область ста- бильности, °C	Удельный вес, тс/м ³	Полиморфизм и темпе- ратура превращения	Объемный эффект прев- ращения, %
β-кварц	До 573	2,65	β-кварц → α- кварц при 573°C	+0,82
α-кварц	573—850	2,53	α-кварц → α- -тридимнит при 870°C	+16,0
			α-кварц → α- -кристобалит при 1000°C	+15,4
			α-кварц → α- -стекло при 1723°C	+15,5
γ-тридимнит	До 117	2,27—2,35	γ-тридимнит → → β-тридимнит при 117°C	+0,2
β-тридимнит	117—163	2,42	β-тридимнит → → α-тридимнит при 163°C	+0,2
α-тридимнит	870—1470	2,23	—	—
β-кристобалит	180—270	2,38—2,34	β-кристобалит → → α-кристоба- лит при 270°C	+3,7
α-кристобалит	1470—1713	2,23	—	—

Коэффициент линейного расширения у кварцита при температуре до 1000°C составляет $(13,5 \div 14,0) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, а свыше 1000°C — $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Кристобалиты имеют меньший коэффициент линейного расширения, поэтому применение их позволяет снизить напряжения в футеровке, что способствует уменьшению ее роста.

Наиболее благоприятным фазовым составом для кварцито-вой футеровки является тридимитовый, обеспечивающий ста-бильный объем футеровки при большом числе теплосмен. В ка-честве связующей добавки применяют борный ангидрид или борную кислоту. Количество связующего вещества назначают опытным путем в зависимости от качества материала футеров-ки, емкости печи, условий эксплуатации и других факторов.

Исследования показали, что количество борного ангидрида не должно превышать 1,5%, причем количество его берут раз-ным для подины и стенок тигля по высоте [32]. Для некоторых

кварцитов при добавке борного ангидрида сверх 1,5% замедляется процесс тридимитизации.

Определяющим условием стойкости и надежности футеровки является правильный подбор зернового состава массы. Огнеупорные материалы делят на три фракции: крупную, среднюю и мелкую. Мелкая фракция дает хорошее спекание кварцитовой массы, однако при слишком большом ее количестве получается глубокое и даже сквозное спекание стенок тигля, недопустимое для индукционных печей. Увеличение в кварцитовой массе крупной фракции улучшает теплоизоляционные свойства стенки тигля, но понижает плотность набивки и спекаемость массы, а также замедляет превращения кремнезема, поэтому поставщики рекомендуют гранулометрические составы кварцитовых масс в соответствии с проведенными исследованиями. В табл. 12 даны зерновые составы наиболее часто применяемых кварцитовых масс.

12. Гранулометрический состав кварцитовых масс для футеровки тиглей

Материал	Содержание фракций в [%] при размере частиц, мм				
	более 3	3—1	1—0,5	0,5—0,088	менее 0,088
Шведский кварцит зернового состава					
Н-4	0	25	15	35	25*
Кварцевый песок Ашкуньского карьера					
Литовской ССР	0	45	—	15	40
Первоуральский кварцит 3-0	0	45	15	15	25*
Шихта мартеновского динаса с Перво- уральского динасового завода	0,7	46	9,2	19	25,1
Овручский кварцит	—	40	—	20	40

* В том числе фракция размером $\leq 0,06$ мм составляет 15%.

В период эксплуатации в результате спекания в стенке набивного кварцитового тигля образуются три зоны (рис. 28): малоизмененная (буферная), примыкающая к индуктору; переходная, в которой масса неполностью спечена, и рабочая спеченная в районе контакта с расплавом. Четких границ перехода одной зоны в другую не наблюдается, но по фазовому составу и теплофизическим параметрам все зоны существенно отличаются друг от друга. В табл. 13 для примера показан фазовый состав футеровки из Первоуральского кварцита, проработавший 321 плавку.

Данные по фазовому составу футеровки, проработавшей 306 плавку, приведены в табл. 14 [32].

Наиболее распространенной является футеровка индукционных печей из кирпичей. Кирпичи для футеровки изготавливают

обычно машинным способом, поэтому они имеют однородную структуру и небольшую пористость. Возможность появления трещин в кирпичной футеровке меньше, чем в набивной, кроме того, она меньше разъедается шлаком. Швы между кирпичами промазывают огнеупорной глиной. Такую футеровку не нужно спекать, ее только прогревают до рабочих температур.

В последнее время начали использовать комбинированные футеровки, выполненные из кирпичной кладки и набивной кварцевой футеровки, которую по мере износа ремонтируют [38].

Наиболее часто применяют набивную футеровку, которую можно выполнять двумя способами: по-сырому и по-сухому. При способе по-сырому получают монолитный тигель, в котором все зерна прочно связаны между собой. Однако при эксплуатации таких тиглей велика вероятность образования трещин. Более целесообразной является изготовление футеровки по-сухому из набивных масс. Набивку футеровки в этом случае ведут послойно, уплотняя сухую порошкообразную массу вибратором по шаблону. Шаблоны изготовляют из листовой стали, чугуна, асбеста или графита. Их устанавливают на днище и центрируют относительно индуктора для получения равномерной толщины стенки. Спекание и обжиг футеровки можно осуществлять по расплавленному шаблону, в этом случае шаблон при спекании расплавляется вместе с загружаемой шихтой, и по удаляемому шаблону, который после набивки тигля удаляется и может быть использован несколько раз.

Металлический расплавляемый шаблон, показанный на рис. 29, изготовляют из двух половин цилиндров. На стенке шаблона предусматривают отверстия диаметром 15—20 мм, расположенные в ряд или в шахматном порядке по всей поверхности. Эти отверстия служат для удаления влаги из футеровки при спекании.

После набивки стенки тигля на высоту нижней части устанавливают верхнюю часть металлического шаблона и обязательно

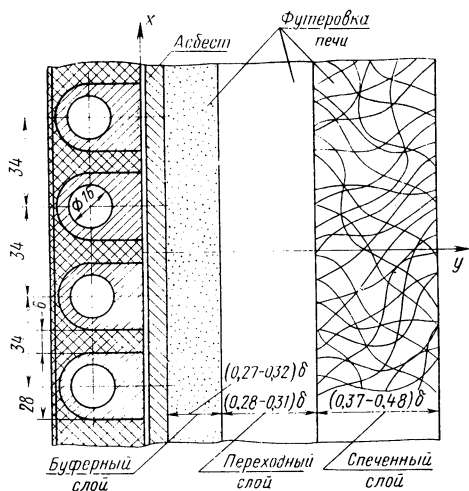


Рис. 28. Оптимальное по толщине расположение зон в стенке кварцитового тигля, δ — толщина футеровки

13. Фазовый состав рабочих зон тигля после 321 плавки

Участок тигля	Расстояние от верха, мм	Содержание, %				
		Кристаллит (метастабильный)	Тридимит	Силикаты	Шпинелид	Стекло-видное вещество
Под носком	110	10—15	40—55	15—20	20—25	—
	350	—	88—92	—	—	8—12
Справа от носка	490	5—6	60—70	2—3	8—10	10—15
	540	—	67—70	15—18	1	10—12
Против носка	720	—	70—75	2—3	1—2	20—25
Слева от носка	1340	10—15	75—85	—	1—2	5—10
Подина	—	Следы	88—92	2—3	—	5—10

14. Фазовый состав рабочих зон после 306 плавки

Место отбора пробы	Зона футеровки	Огнеупорность, °С	Удельный вес, т/м³	Фазовый состав, % [дополняется до 100% рентгеноаморфной фазой]		
				Тридимит	Кристаллит	Кварц
Верх тигля (200 мм ниже сливного носка печи)	Рабочая (контактная с металлом)	—	—	16	13,5	26
	Переходная	1750	2,634	—	2	95
Середина печи (500 мм ниже сливного носка)	Рабочая	1550	2,523	25,5	21	45
	Переходная	1770	2,602	—	1,5	94,5
	Малозмененная (у индуктора)	1770	2,654	—	—	100
Под печи (800 мм ниже сливного носка)	Рабочая	1610	2,477	34	9	7
	Переходная	1770	2,559	—	12	73
	Малозмененная	1760	2,622	—	3	80
	Сыпучий (буферный) слой с пода печи	1770	2,631	—	—	100

сваривают сплошным швом стык цилиндров с внутренней стороны, это необходимо для предотвращения перегрева на стыке и коробления шаблона при включении печи.

От качества выполнения набивных работ зависит стойкость тигля. Удельный (объемный) вес уплотненной массы должен быть не меньше $2,08\text{--}2,1\text{ тс/м}^3$, что вполне достижимо при тщательном соблюдении технологии набивки. Необходимо выполнять следующие правила набивки: вначале выкладывают под печи фасонным шамотным кирпичом, швы между кирпичами промазывают сметанообразной жидкостекольной массой и затем просушивают электрическими лампами в течение нескольких дней (см. рис. 26).

Жидкостекольная масса состоит из кварцита и жидкого стекла. В подине предусматривается отверстие диаметром, равным диаметру центрального стержня плюс $0,5\text{ мм}$. К центральному стержню присоединяется хромоникелевый электрод сигнализатора проедаания тигля. Высота электрода должна быть равной высоте подины. Некоторые фирмы устанавливают сигнализатор на сливном носке, тогда необходимость отверстия в подине отпадает.

Перед набивкой тигля из печи удаляют сор, устанавливают и крепят тепловую изоляцию индуктора из листового асбеста. На площадке печи в специальных поддонах размером $2000 \times 2000\text{ мм}$ перемешивают сухую (не более $0,3\%$ влаги) футеровочную массу с борным ангидридом. Во избежание сквозного пропекаания подины и опасности трещинообразования нижнюю половину подины набивают массой без связующих добавок. Массу подают на под печи отдельными порциями для образования слоя толщиной 50 мм . Каждый слой выравнивают специальной лопаткой (рис. 30). После этого двое рабочих трамбуют каждый слой с помощью вибротрамбровок последовательно друг за другом, чтобы избежать пропусков в трамбовке. Плотность утрамбованного слоя проверяют лопаткой, она не должна внедряться в уплотненный слой при нажатии.

Для футеровки пода печи емкостью 12 т для одного слоя требуется 100 кг футеровочной массы. Перед наложением второго слоя утрамбованную поверхность взрыхляют (см. рис. 30). После наложения первых трех слоев следующие слои трамбуют с применением борного ангидрида. Перед смешиванием с порош-

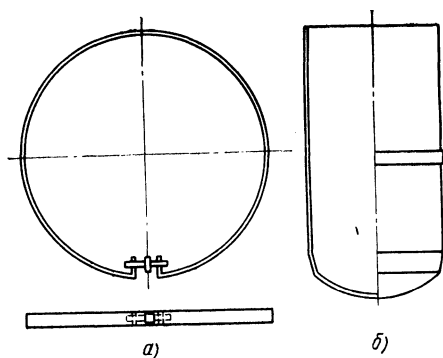


Рис. 29. Металлический шаблон для набивной футеровки тигля (а) и металлическое кольцо для поддержания асбестовых листов (б)

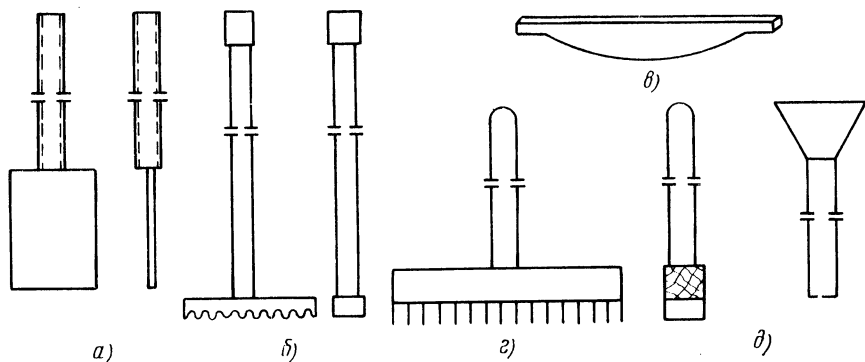


Рис. 30. Приспособления и инструмент для выполнения набивной футеровочной массы:

а — лопатка; б — вибротрамбовка; в — деревянный шаблон; г — рыхлитель; д — воронка с трубой

кообразным кварцитом борный ангидрид просеивают через сито с ячейкой 0,63 мм. После этого смесь тщательно перемешивают лопаткой. Технология набивки последующих слоев такая же, как и первого слоя. Особое внимание следует уделять наибольшему уплотнению футеровочной массы вокруг электрода сигнализатора повреждения футеровки. При достижении заданной толщины слоя смеси приступают к формированию пода под металлический или деревянный шаблон (см. рис. 30) с применением уровня. Вращением шаблона относительно оси печи получают необходимую форму подины. После выравнивания пода конец электрода должен быть заподлицо с футеровкой пода или ниже его не более чем на 10 мм.

Следующей операцией является установка нижней половины металлического шаблона, который должен плотно прилегать к поду и быть хорошо отцентрирован относительно стенок катушки индуктора. Для плотного прилегания к поду шаблон притирают поворотами влево и вправо в подвешенном состоянии. После этого шаблон нужно извлечь и проверить правильность прилегания. Если прилегание неполное, то требуется дополнительная формовка пода. Металлический шаблон центрируют с помощью специального приспособления и буковых клиньев (рис. 31).

Следует обращать внимание на плотность набивки в местах перехода сферической части в цилиндрическую. После центровки шаблона на его дно помещают груз массой 2—3 т, который фиксирует положение шаблона, а также служит площадкой, на которой рабочие стоят при набивке стенок тигля.

Перед набивкой стенок нужно взрыхлить контактную поверхность рыхлителем, затем засыпать готовую массу в зазор между шаблоном и катушкой индуктора. Засыпают смесь через воронку с трубой, перемещая ее вокруг металлического шаблона (см.

рис. 30). Технология трамбовки такая же, как и пода. По мере набивки стенок металлические кольца, прижимающие асбест к катушке индуктора, снимают. После того как расстояние между футеровкой стенок тигля от верхней кромки нижнего шаблона достигает 100 мм, устанавливают верхнюю половину металлического шаблона и приваривают ее электросваркой к нижней. Затем продолжают послойную набивку стенок, добиваясь наибольшего уплотнения массы. Верхнюю часть стенок тигля на участке высотой 200 мм набивают футеровочной массой с увеличенным содержанием борного ангидрида (в печи емкостью 12 т — 2% B_2O_3).

Шамотный радиальный кирпич, которым футеруют верх тигля, выкладывают с противоположной сливному носку стороны (рис. 32). Швы между кирпичами промазывают огнеупорной глиной. Зазор между фасонным шамотным кирпичом, футерующим верх печи, и радиальным шамотным кирпичом не промазывают, так как через него должна удаляться вода при спекании.

Сливной носок выкладывают шамотным кирпичом и футеруют смесью, состоящей из молотого кварцита с цементом. Перед набивкой носка в эту смесь добавляют 12% воды, после чего непосредственно перед спеканием производят набивку. Затем сливной носок окрашивают водной краской на основе графита. Это

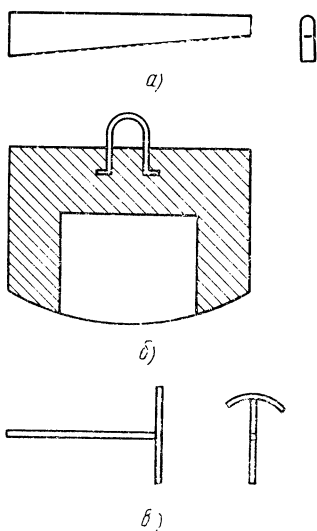


Рис. 31. Специальные приспособления для установки и центрирования металлического шаблона:

а — клин; б — груз; в — приспособление

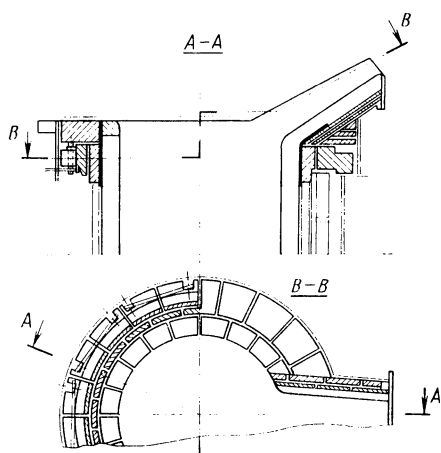


Рис. 32. Футеровка верха тигля и верха печи фасонным шамотным кирпичом

необходимо делать через 2 ч с момента включения печи на спекание.

После выполнения всех работ по набивке стенок, выкладывания верха тигля и верха печи приступают к сушке и спеканию тигля. Перед началом спекания груз из металлического шаблона убирают и вместо него устанавливают пусковой слиток массой 2—3 т. Спекание ведут в соответствии с установленным температурным режимом.

Спекание производят в три этапа. В первом этапе путем включения и выключения главного контактора медленно разогревают шаблон до температуры 1200°C по всей высоте. Длительность этапа 5—5,5 ч (рис. 33). Разогрев ведется с открытой крышкой печи, чтобы удалить пары воды через отверстия в металлическом шаблоне. При достижении температуры шаблона 1200°C в тигель быстро заливают жидкий металл с температурой $1250\text{—}1300^{\circ}\text{C}$, уровень которого должен быть максимальным для обеспечения спекания верхних слоев футеровки.

Во втором этапе осуществляется медленный нагрев жидкого металла в течение 3 ч до температуры 1500°C переходом с низких на высокие ступени трансформатора.

Третий этап — выдержка металла в тигле при 1500°C в течение 1,5 ч.

Особенно ответственен первый этап спекания, так как в этот период может быть коробление шаблона и повреждение футеровки.

3. НЕЙТРАЛЬНАЯ ФУТЕРОВКА

Нейтральная футеровка состоит из огнеупорных материалов, имеющих окислы Al_2O_3 и SiO_2 в последовательно изменяющихся соотношениях. В высокоглиноземистых огнеупорах содержание Al_2O_3 изменяется от 45 до 100. На диаграмме, приведенной на рис. 34, показаны соотношения $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ [29], по которым можно классифицировать огнеупоры, а также фазовые превращения, состав и температуру плавления всех высокоглиноземистых материалов.

По содержанию Al_2O_3 все огнеупорные материалы делятся на полукислые Al_2O_3 (15—30%), шамотные (30—45%) и корундовые или высокоглиноземистые (45—100%). По минералогическому (фазовому) составу различают каолиновые огнеупоры (46% Al_2O_3 и 54% SiO_2), силлиманитовые (63% Al_2O_3 и 37% SiO_2), муллитовые (72% Al_2O_3 и 28% SiO_2), муллитокорундовые (больше 72% Al_2O_3) и корундовые (98—100% Al_2O_3). В табл. 15 показана область стабильности объема высокоглиноземистых материалов.

Высокоглиноземистые материалы выдерживают многократную смену температур и при этом сохраняют постоянный объем. Они хорошо противостоят трещинообразованию и, главное, не

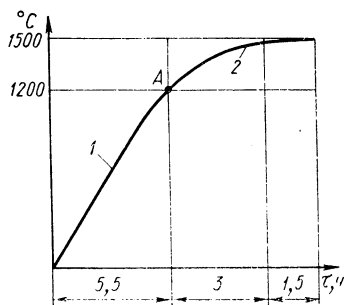


Рис. 33. Кривая изменения температуры при спекании кварцитового тигля в индукционной тигельной печи емкостью 12 т:

1 — температура шаблона и твердой садки; 2 — температура тигля и металла; А — температура начала плавления 1200°C

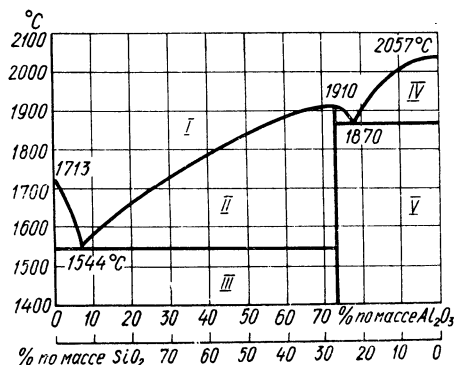


Рис. 34. Диаграмма состояния системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$:

I — область жидкой фазы; II — жидкая фаза + муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$); III — муллит + крестобаллит (SiO_2); IV — жидкая фаза + корунд (Al_2O_3); V — корунд + муллит

вступают в химические реакции с расплавленным металлом и шлаком. Это обуславливает возможность применения их для футеровки индукционных тигельных и канальных печей.

В канальных печах применяют пластическую футеровочную массу, которая требует медленной сушки. В последнее время для футеровки тигельных печей используют сухую глиноземистую массу. В качестве связующей добавки применяют борный ангидрид в количестве 1—1,5% или содержащие его материалы (дюр-

15. Модификации превращений высокоглиноземистых материалов при нагревании и охлаждении

Материал и его модификация	Область стабильности, °C	Удельный вес, т/см ³	Полиморфизм и температура превращений	Объемный эффект превращений, %
Дистен	Не более 1300—1350	3,5—3,6	Дистен → муллит при 1300—1350°C	+ (16,0—18,0)
Силлиманит	1500	3,23	Силлиманит → муллит при 1500—1550°C	+ (7,0—8,0)
Муллит	20	3,02	Устойчив	—
Корунд	20 и выше	3,99	То же	—
Глинозем	До 900—1200	3,45—3,6	γ-глинозем → α-глинозем при 900—1200°C	— (9,7—13,5)

морьтреит или еремеевит) [5]. Используют также силиманитовые материалы.

Для футеровки тиглей используют массы с определенным соотношением корунда и дистенсиллиманита (табл. 16), что обязательно для получения качественно спеченной футеровки. Метод набивки ничем не отличается от описанного выше способа набивки кварцитовых тиглей. Существенным недостатком такой футеровки является высокая ее стоимость.

16. Химические и зерновые составы набивных масс, применяемых для нейтральной футеровки индукционных печей

Материал	Зернистость, мм	Химический состав, % по массе						
		Al ₂ O ₃ не менее	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CuO	Na ₂ O K ₂ O	MgO
Электрокорунд нормальный:								
Э-4	1,25 и выше	93,5	2,0	0,8	2,0	1,0	—	—
Э-5	1,25 и выше	94,5	2,0	0,5	1,5	0,5	—	—
Дистен-силлиманитовый концентрат:								
ДСК-3	0,16—0,1	57,0	1,0	0,6	40,0	0,2	0,1	0,4
ДКС-П	0,05 и более	57,0	1,0	0,6	40,0	0,2	0,1	0,4

При спекании сухой набивной футеровки из высокоглиноземистых огнеупоров по сравнению с кварцитовой футеровкой имеется возможность сокращения времени спекания (рис. 35). Составы огнеупорных масс, применяемых для футеровки канальных печей, и способы футеровки приведены в табл. 17, из которой видно, что в канальной печи футеровку выполняют двумя разными способами для индуктора и для ванны печи и крышки. Рассмотрим для примера один из возможных вариантов выполнения футеровки канальной печи (рис. 36).

При заливке футеровочной массы индуктор собирают согласно чертежу. Электроизоляцию индуктора проверяют на сопротивление между изолированными гильзами, шайбами, болтами и заземленными конструкциями, которое должно составлять не менее 0,5 МОм. Для сушки футеровки индуктора печную установку оборудуют специальным трансформатором мощностью 150 кВт. Затем внутреннюю поверхность индуктора выкладывают слоем асбеста, который должен воспринимать при спекании

усилия, вызванные расширением стенок индуктора. Асбест крепят к индуктору с помощью клея и сверху покрывают герметизирующей пленкой (лаковой, пленочным материалом или тонкозернистой массой). В индуктор устанавливают чугунный шаблон для канала, который с помощью зажимного приспособления фиксируется в требуемом положении. Расстояние между шаблоном и индуктором должно быть одинаковым по всей дуге нижнего сектора.

Футеровку для заливки готовят в смесителе, в котором роданит тщательно смешивают с чистой водой в количестве 6—8% от сухой массы при комнатной температуре. Сразу после приготовления массу следует заливать в индуктор, причем заливать равномерно по всему индуктору небольшими порциями и после каждой порции тщательно уплотнять электровибратором. Выводить и вводить вибратор в массу нужно медленно для того, чтобы в ней не образовалось пустот, заливку производят до отметки 5—10 мм над фланцем индуктора. Через 1 ч выступающую массу над фланцем следует аккуратно снять. После сушки на воздухе 24 ч снимают зажимное приспособление.

Зафутерованный индуктор устанавливают на деревянное или бетонное основание, после чего включают трансформатор для сушки. Для проверки температуры в шаблон канала устанавливают термомпару. Имеющиеся на индукторе отверстия для воздушного охлаждения во время сушки оставляют открытыми. Шаблон и

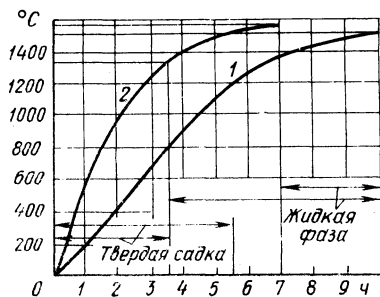


Рис. 35. Диаграмма спекания тиглей, футерованных кварцовой 1 и нейтральной 2 массой

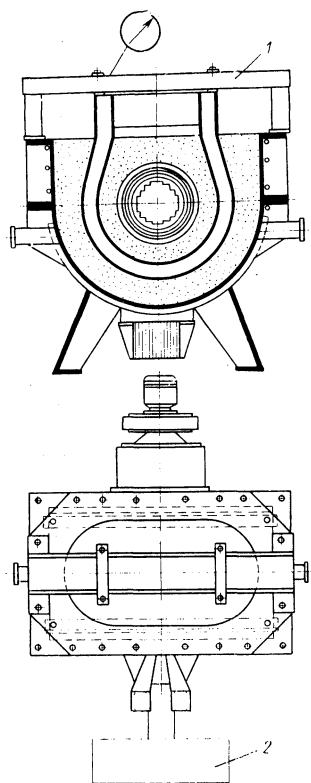


Рис. 36. Схема сушки и подогрева футеровки индуктора индукционной каналной печи:

1 — зажимное приспособление;
2 — трансформатор для сушки

17. Характеристика огнеупорных масс и методов футеровки канальных печей

Назначение	Марка роданита	Способ футеровки	Состав, %				Влажность, %
			Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Примес- и R ₂ O ₃ , TiO ₂	
Ванна печи	N	Трам- бовка	81	18	—	1—5	2,5—3
Каналь- ный блок	FS	То же	95	—	—	—	—
Крышка	№ 6	Заливка	95	—	—	5	5—6
			80	7,5	8,0	4,5	19

Назначение	Размер зерен, мм	Удельный вес, тс/м ³	Объемный вес в уплот- ненном сос- тоянии, тс/м ³	Прочность на изгиб, кг/см ²	Пористость, %	Температура плавления, °C	Коэффициент расширения при нагреве от 20 до 1400°C
Ванна печи	≤ 6	3,75	2,8	2,3	12—13	1830	8×10 ⁻⁶
Канальный блок . .	(0—0,25) — —42 %;						
	(0,25—1) — —17 %	3,75	3,3	—	17—18	1950	9×10 ⁻⁶
Крышка . .	(1—5) — 41 %	3,75	3,1	—	—	1750	9×10 ⁻⁶
	≤ 3,0	3,75	2,5	—	—	1750	9×10 ⁻⁶

верхнюю поверхность индуктора для теплоизоляции покрывают листовым асбестом. Напряжение следует повышать постоянно, чтобы температура шаблона изменялась по кривой, показанной на рис. 37.

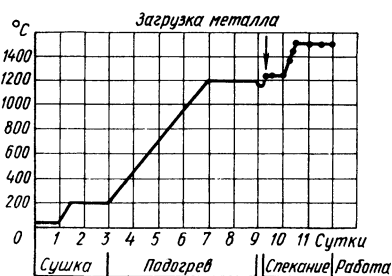


Рис. 37. Диаграмма сушки, подогрева и спекания футеровки канальной печи

Температура на корпусе индуктора должна колебаться в пределах 100—120°C. При несоблюдении температурного режима не будет полного удаления воды из футерованной массы.

Набивную футеровку выполняют после полной разборки индуктора. Шаблон необходимо изолировать лентой. Нижнюю и

верхнюю части корпуса индуктора изнутри нужно выложить асбестом и все части тщательно прочистить. Массу поставляют обычно в готовом виде, набивку выполняют послойно и каждый слой тщательно утрамбовывают вибраторами и трамбовками. Сушку футеровки производят так же, как и сушку индуктора, зафутерованного методом заливки, процесс спекания по режиму, показанному на рис. 34.

4. ОСНОВНАЯ ФУТЕРОВКА

В индукционных печах основную футеровку применяют редко, поэтому рассмотрим только узловые вопросы.

Основную футеровку изготовляют из магнезитовых, доломитовых, известковых и других материалов, в которых содержится большое количество окислов магния и кальция (MgO , CaO). Эти материалы имеют огнеупорность выше $2000^{\circ}C$, хорошо противостоят воздействию основных шлаков, но стойкость тиглей, изготовленных из этих материалов, очень низкая.

Наиболее распространены магнезитовые огнеупоры в спеченном и плавленном состояниях (табл. 18), так как коэффициенты линейного расширения у основных футеровочных масс настолько велики, что использовать их в исходном состоянии невозможно. Применяют материалы полностью обожженные, плавленные или с применением специальных добавок. Обычно добавляют хромиты, кварцевые пески, кварциты и другие материалы, уменьшающие усадку основной футеровки при $1500\text{--}1600^{\circ}C$ и обеспечивающие их некоторый рост при $1150\text{--}1400^{\circ}C$.

18. Химический состав магнезитовых огнеупоров, %

Магнезит	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Прочие примеси
Спеченный порошок (металлургический) .	85,0—89,0	3,5—5,5	3,0—4,0	2,0—5,5	0,3—0,4
Плавленный	94,0—97,0	0,9—1,5	0,5—2,0	1,0—1,5	0,2

Магнезитовые огнеупоры изготовляют из горных пород магнезита. В последнее время распространение получил способ добытия магнезии из морской воды. Из нее получают магнезитовые огнеупоры с содержанием до 99% MgO .

Кроме того, для футеровки применяют цементы на основе MgO . В этом случае тигель набивают сухой массой, увлажнения не допускают, так как MgO образует с водой гидроокиси. Встречаются литые футеровки печей из плавленного магнезита [35]. В этом случае футеровку выполняют трехслойной: твердая внутренняя зона, мягкая средняя и литая внешняя зона. Но чаще

всего основную футеровку выполняют из кирпичей, при этом повышается способность ее противостоять трещинообразованию и разъеданию шлаком и расплавом.

Для основной футеровки кроме окислов MgO применяют материалы, содержащие окислы CaO . При плавке чугуна в печи с основной футеровкой из кристаллической извести в нем снижается содержание серы и кислорода, поэтому такую футеровку можно применять для выплавки высококачественных чугунов с пластинчатым графитом, модифицированным магнием или ферросилицием.

Преимущество основных футеровок — их устойчивость при высокой температуре к основным шлакам. Для более широкого применения основных футеровок в индукционных печах необходимы дополнительные разработки и исследования.

5. СТОЙКОСТЬ ФУТЕРОВКИ

Одним из основных условий надежной и экономичной работы индукционной плавильной установки является стойкость и надежность тигля.

В табл. 19, по данным ВНИИЭТО, представлены данные по стойкости тиглей на различных заводах в зависимости от типа печей, материалов футеровки, способов набивки и других факторов. Чем же определяется стойкость тигля? Прежде всего она определяется материалом футеровки, стойкостью этого материала к воздействию шлаков, образующихся в расплаве, а также к эрозии и коррозии. Последние неизбежно возникают в результате взаимодействия расплава со шлаком и вследствие перемешивания расплава.

Максимальный износ тигля наблюдается в нижней части, на границе с остатком жидкого металла (зумпфа). Износ подины увеличивается во всех случаях по мере увеличения продолжительности эксплуатации тиглей. Верхняя зона, соответствующая полному заполнению тигля расплавленным металлом, по всему периметру имеет шлаковый нарос (настил). Одной из наиболее возможных и частых причин выхода футеровки из строя является образование трещин в спеченном тигле. Жидкий металл проникает в трещины, подвергается воздействию электромагнитной индукции, что вызывает еще больший износ тигля. Для предупреждения трещинообразования наиболее существенным является рациональный температурный режим стенок тиглей при эксплуатации. Желательно, особенно при кварцитовых тиглях, не допускать понижения температуры в стенке тигля ниже $800^{\circ}C$, так как при температурах ниже $700^{\circ}C$ кварцевая футеровка сильно расширяется, а выше $700^{\circ}C$ коэффициент линейного расширения уменьшается почти вдвое. По этой причине

19. Статистические данные, характеризующие стойкость футеровки в индукционных плавильных печах для плавки чугуна на различных заводах СССР

Предприятие	Тип печи	Электронное управление	Режим работы печей [количество смен и остановок]	Состав футеровки	Вид и количество спекания, %	Зумиф. т	Марка выплавляемого чугуна	Число плавов до замены футера, пролитая, потеря, кампания	Удельный расход футеровочной массы, кг/т чугуна	Температура перегрева чугуна, °С	Длительность выдержки чугуна при температуре 1450°С, ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
«Центролит» (г. Каунас ²)	ИЧТ-10	Прокладки из электрона	3 смены (с остановками на выходные дни)	Анжиский кварцевый песок — 55%; болотовский маршалит естественный — 40%	Борная кислота 1,5—2,5	4	СЧ 50-90 СЧ 21-40 СЧ 28-48 СЧ 32-52	Без ремонта монта 150 плавок, 24 рабочих дня, с ремонтом 186 плавок, 32 рабочих дня, 2 месяца	2,5	1450—1550	0,3
			2 смены	Кварцит, ГОСТ 9851-68	Борная кислота 2,0	2—3	СЧ 15-32 (специальный чугун)	2 месяца	—	1550	0,5
Литейный завод (г. Кулявск)	ИЧТМ-10	Обмоточная	3 смены (без остановок)	Первоуральский молотый кварцит	Борная кислота 2—3	1,5—2,0	СЧ 21-40 СЧ 15-32 ВЧ 50-2 ВЧ 45-5	200—250 плавок от 100 до 120 суток	10 при плавке СЧ и 15 при плавке ВЧ	1450—1500	—
«Центролит» (г. Рустави)	ИЧТ-10	Прокладки из электрона	3 смены (с остановками на выходные дни)	Кварцит молотый овручский. Зерновой состав:	Борная кислота 1,5—2,0	0,3	СЧ 21-40	250—300 плавок (до двух месяцев)	1,7—2,0	1450±20	0,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(г. Запорожье)				сок: не менее 98% SiO_2 , не более 0,5% Al_2O_3	2,0		гун КЧ 30-6	20 дней			
Завод «Серп и Молот» (г. Харьков)	ИЧТМ-6	"	"	Кварцит Овручский, зернистость 2—3 мм	Борная кислота 2,5—3,0	—	ВЧ 70-3	20 суток	5	1450—1500	1—15
Автогаз (г. Горький ³)	ИЧТ-6	"	"	Кварцит мелко-молотый Первоуральский ПКМИ-97,5: не менее 97,5% SiO_2 , не более 1,3% Al_2O_3 . Зерновой состав: мельче 0,1 мм — 30—35%; 0,1÷0,5 мм — 20—25%; 0,5÷1,0 мм — 15—20%; 1,0÷3,2 мм — 25—30%; более 3,2 мм — не более 5%	Борный ангидрит 1,0	1	Нирезист	70—80 плавок, 2—3 месяца	5,5	1500—1550	—
Автогаз (г. Горький ³)	ЛФД-12	Монолитная полимерная	3 смены (с остановками на выходные дни)	То же	Борный ангидрит 1,0	2—6	ВЧ 50-1,5	260—280 плавок, 4—5 месяцев	1	1400—1450	—
Алюминиевый завод имени 50 лет	ИЧТ-2, 5М1	Обмоточная	2 (с остановками на выходные)	Кварцитовый песок — Пинежского стекольного завода;	Борная кислота	0,5	ЛК1 по ГОСТ 4832—72	Без ре-монта	12,5—15	1400—1450	0,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ВЛКСМ (г. Красноярск)			дни)	Аниксийский карьер Литовской ССР. Маршалит — Челябинская обл. Эмен-желинский карьер				плавок, с ремонтом 80—85 плавок			
«Водмаш-оборудование» (г. Воронеж)	ИЧТМ-2,5	То же	То же	Дистенсилам-нит — ДСК-3 — 87,5%; ДСК-П — 12,5%	Борная кислота 1,6—2,5	0,25	СЧ 21-40 СЧ 26-48 СЧ 32-52 СЧ 18-36	20—22 рабочих дней	1,9	1450±50	—
ЗИЛ (г. Москва)	АЯКС-3	—	3 (с остатковкой на выходные дни)	Первоуральский кварцит ПКММ-97. Зерновой состав: 1÷5 мм — 30%, менее 1 мм — 70%	Борная кислота 1,5—2,0	Без азота	—	80—100 плавок, 8—10 дней	10	1550	—
Вселянский автомобильный завод (г. Тольятти)	ЛФД-6	Монолитная постоянная	То же	Первоуральский кварцит ЦКМИ-97,5. Зерновой состав: до 0,1 мм — 25—30% 0,1÷0,5 мм — 20—25% 0,5÷1,0 мм — 15—20% 1,0÷3,2 мм — 25—30% 3,2 мм — не более 5%	Борный ангидрид 0,6	2—5	Gh 2,6 Gh 2,6 блочный	25 дней	6—7	1500—1550	0,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
То же	ЛФД-25	Монолитная полимерная	„	То же	То же	5—18	То же	То же	3,2	То же	0,5
«Центролит» (г. Каунас)	ЛФД-8	Прокладка из электролита	3 смены (с остановкой на выходные дни)	Кварцитовый песок Аниксийского карьера, маршалит Бологовский карьер. Не менее 98% SiO_2 , не более 0,5 Al_2O_3 . Зерновой состав:	Борная кислота 1,5—2,5	4	СЧ 21-40 СЧ 50-90 СЧ 28-48 СЧ 32-52	Без ремонта 150 плавок, 24 рабочих дня; с ремонтом 180 плавок 32 рабочих дня	1,5	1450—1550	0,5
				до 0,1 мм 40—45%; 0,1 ÷ 0,63 мм 20—10%; 0,63 ÷ 2,5 мм 40—45%							

¹ В типе печи цифра указывает емкость печи в тоннах.

² Состав шлака на заводе «Центролит» (г. Каунас): до 0,2% Cr; до 0,2% Ni; 50—90% Si; 5—13% FeO; до 10% CaO; 5—15% K_2O .

³ Состав шлака на Автогазе при плавке чугуна пирезист: 78,82% SiO_2 ; 0,68% Al_2O_3 ; 0,23% Fe_2O_3 ; 2,17% FeO; 5,83% CaO; 3,16% MgO; 0,22% K_2O ; 1,08% B_2O_3 ; 0,31% TiO_2 .

частые охлаждения тигля до 700°С и ниже вызывают ускоренный износ футеровки.

Другим фактором, определяющим стойкость тигля, является наличие и взаимодействие трех зон в стенке: рабочей, переходной и неизменной. Наличие неизменной зоны обязательно, так как она служит буфером и предупреждает прорыв жидкого металла к изоляции индуктора. На рис. 28 показаны соотношения протяженности слоев в стенке тигля печи емкостью 12 т. Для сохранения буферного слоя в стенке тигля необходимо применять указанные выше количества борного ангидрида, а теплофизические характеристики применяемых материалов должны обеспечивать большой температурный перепад.

Толщина буферного слоя зависит от толщины тепловой изоляции индуктора. Исследования показали, что чем больше толщина асбестовой изоляции индуктора, тем меньше толщина буферного слоя (табл. 20). Это приводит к более глубокому спеканию тигля и к возможности прорыва жидкого металла к индуктору.

20. Распределение зон в стенке тигля в зависимости от толщины асбестовой изоляции

Толщина, мм		Плотность теплового потока q , ккал/(м ² ·ч)	Толщина зон, мм		Количество передаваемой теплоты Q , ккал/ч	Потери, %
асбестовой изоляции	неизменной зоны, х		спекания у	остеклования z		
3	42	13 000	32	46	90 500	7,7
6	38	12 450	35	47	86 500	7,2
8	30	11 250	40	50	78 000	6,5
11	23	10 450	45	52	73 500	6,0

Буферный слой в стенке тигля необходим для предохранения стенок индуктора от деформации при росте тигля в условиях изменяющихся температур.

Существенное значение для стойкости имеет емкость тигля. Чем больше объем тигля, тем больше степень его износа. Это объясняется тем, что внутренние напряжения в стенках тигля прямо пропорциональны его объему. Контактная поверхность тигля с металлом увеличивается, поэтому степень взаимодействия системы тигель — металл — шлак также становится больше. Установлено также, что стойкость тигля зависит от геометрической формы его внутреннего пространства. Самой рациональной является коническая форма тигля по сравнению с цилиндрической и другими. Лучшим соотношением размеров считают отно-

шение высоты к среднему диаметру тигля (внутреннему) около 2:1 [4].

Обязательным условием для надежной и длительной эксплуатации тиглей является правильный выбор огнеупорных материалов, их физико-химических свойств и гранулометрического состава. В технологии выполнения футеровки должна быть предусмотрена возможность увеличения износостойких свойств, особенно в районе предполагаемого разрушения.

Для повышения стойкости тиглей при футеровке увеличивают толщину дна тигля на 50—70 мм, причем первые два-три слоя набивной массы трамбуют без добавления связующей добавки, а следующие слои с добавкой 1—1,6% борного ангидрида; в верхней части тигля, в районе шлакообразующего пояса и наибольшего механического воздействия шихты, содержание борного ангидрида увеличивают до 1,8—2%, что улучшает условия спекания в этой зоне. Кроме того, материалы для футеровки предварительно подвергают термической обработке при высоких температурах, что необходимо для достижения максимальной их химической инертности по отношению к расплаву и шлакам. Футеровочные материалы должны быть плотными по структуре, в них не должно происходить превращений, ведущих к объемным изменениям.

Стойкость футеровки, как указывалось выше, зависит от степени уплотнения, поэтому в шлакообразующих зонах и в зонах разгара при набивке необходимо обеспечить получение более уплотненных стенок тигля, что достигается определенным подбором гранулометрического состава и тщательной трамбовкой. Следует отметить, что гранулометрический состав футеровки особенно влияет на стойкость тигля. По этой причине при применении набивных масс необходимо предварительно обеспечить их тщательное перемешивание, что позволяет получить однородную поверхность тигля. Длительность эксплуатации тигля определяется величиной буферного слоя, который для печей емкостью более 10 т должен составлять к концу кампании не менее 25 мм.

Большое влияние на стойкость футеровки, особенно кварцитовой, оказывает состав шихты. Кварцитовая футеровка сильно разъедается окислами железа, поэтому при подборе шихты необходимо до минимума уменьшить их содержание. Можно также вводить присадки раскислителя в шихту [36]. Сильно окисленный лом должен составлять не более 10—15% общего количества шихты. Некоторые исследователи рекомендуют для повышения стойкости тигля вводить в ванну жидкого металла совместно с графитом силикокальций, что повышает стойкость тигля благодаря улучшению консистенции шлака [36]. При загрузке шихты в тигель следует избегать его механических повреждений.

На длительность работы тигля влияет также вибрация всего печного агрегата. Исследования показали, что при уменьшении

вибрации узла индуктор — тигель повышается стойкость тиглей. Для уменьшения вибрации известны несколько способов. Одним из наиболее эффективных является применение монолитной электрической изоляции индуктора. К немаловажным факторам стойкости тиглей относится соблюдение правил эксплуатации.

Приведенные выше сравнительные данные о стойкости футеровок различных установок (см. табл. 19) также позволяют сделать следующие выводы.

1. Стойкость футеровки выше на тех заводах, где применяют кварцевую футеровку определенного химического и зернового состава.

2. Стойкость тиглей зависит от емкости печи, жесткости (монолитности) индуктора, марки и перегрева выплавляемого чугуна.

6. УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ ФУТЕРОВКИ

Индукционные тигельные печи, как правило, оборудуют приспособлениями для контроля за состоянием футеровки, — так называемыми сигнализаторами проедания тигля. Существующие конструкции сигнализаторов проедания тигля разнообразны, но все они работают по одному принципу. На рис. 38 представлена электрическая схема сигнализатора проедания футеровки, принцип действия которого основан на изменении тока проводимости чувствительного элемента при его нагревании от расплавленного металла в зоне возможного проедания футеровки.

Сигнализатор состоит из переменных резисторов 1, 2, реле 3, вольтметра, трансформатора 4, выпрямителя с фильтрами и фильтра-пробки 5, 6. Переменное напряжение цепей управления 220 В, 50 Гц создает падение напряжения на резисторах 1, 2 и трансформаторе 4. Падение напряжения на трансформаторе зависит от нагрузки на вторичной стороне трансформатора, которая в основном определяется силой тока проводимости через цепь, состоящую из фильтра-пробки, трубки индуктора, изоляции индуктора и футеровки, жидкого металла, донного электрода, и через дроссель 7 к источнику.

Сопrotивление этой цепи, которое определяет падение напряжения на трансформаторе, зависит главным образом от свойств изоляционных материалов индуктора (рис. 39).

Основные недостатки этой схемы: незащищенность подины печи, что создает возможность утечки металла в подину, и то, что индуктор является элементом схемы сигнализатора.

В последнее время стали применять сигнализаторы, у которых чувствительный элемент вынесен впереди индуктора. Например, устройство сигнализатора, используемого в ФРГ, следующее (рис. 40): с наружной стороны стенки тигля 1 располагают два изоляционных слоя 2, между которыми устанавливают электро-

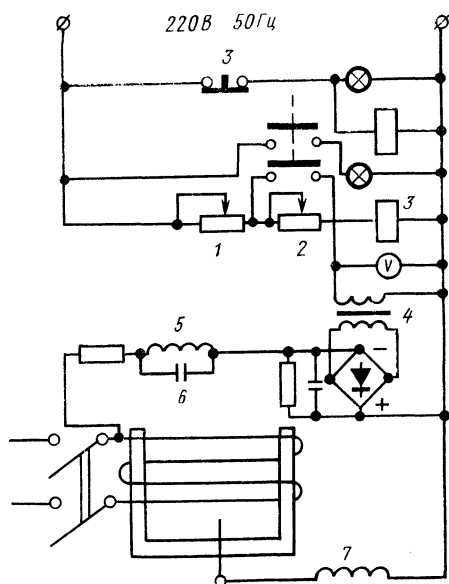
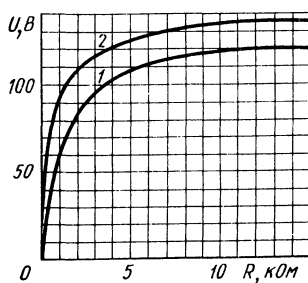


Рис. 38. Схема сигнализатора печи LFD-12

Рис. 39. Зависимость падения напряжения U в трансформаторе от сопротивления цепи защиты R :

1 — низкая чувствительность; 2 — нормальная чувствительность



ды 3, представляющие собой цилиндры из листового электропроводного материала. Эти электроды включены в электрическую цепь с источником тока b , индукционной катушкой 4, измерительным прибором 5 и донным электродом 7. При прорыве металла 8 через возможную трещину в стенке тигля электрическая цепь замыкается через металл, и после этого срабатывает сигнализирующий прибор.

Часто применяют сигнализаторы, контролирующие ток утечки через изоляцию индуктора. На рис. 41 показана схема сигнализатора А. Роббита [22]. Схема контроля футеровки работает на пе-

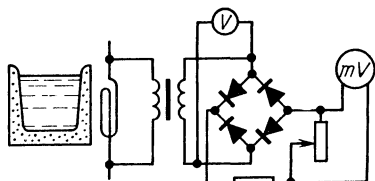
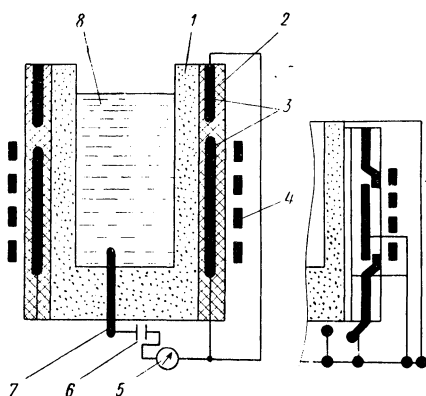


Рис. 41. Сигнализатор, контролирующий ток утечки

Рис. 40. Сигнализатор с вынесенным чувствительным элементом

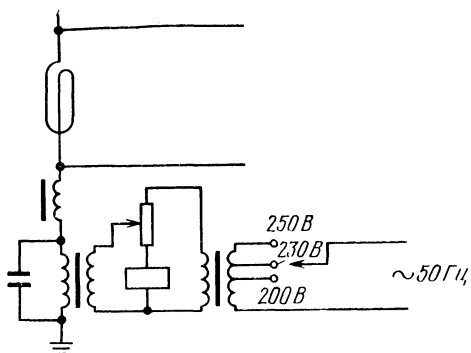


Рис. 42. Сигнализатор MSMA

ременном токе и дополнена аварийным реле, воздействующим на цепь питания печи.

В практике работы с индукционными печами для контроля состояния футеровки используют показания приборов электрического режима печи. При значительном износе тигля вследствие его размытия объем металла увеличивается, что приводит к падению эквивалентного сопро-

тивления индуктора, возрастанию потребляемой мощности и снижению $\cos \varphi$ печи. На этом принципе работают сигнализаторы проедания тигля MSMA [22] (рис. 42). В отечественной практике используют сигнализатор проедания тигля, разработанный ВНИИЭТО, оправдавший себя в условиях эксплуатации. На рис. 43 представлен сигнализатор типа АСЧ (автоматический сигнализатор состояния тиглей печей для черных металлов).

Схема АСЧ построена на принципе непосредственного контроля футеровки при помощи измерения постоянного тока, проходящего через стенку тигля между специальным электродом и

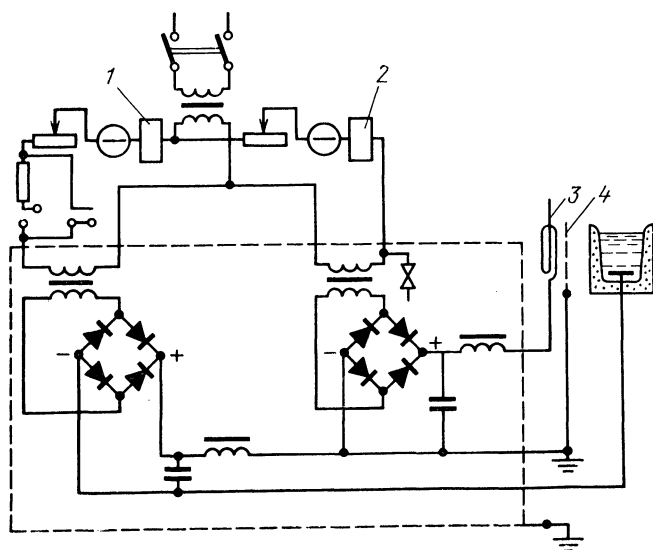


Рис. 43. Сигнализатор АСЧ, применяемый на отечественных печах (ВНИИЭТО)

расплавом, контакт с которым осуществляется через донный электрод. Контроль состояния изоляции индуктора относительно земли ведут по току, протекающему между concentрическим электродом и трубкой индуктора по параллельной цепи.

Таким образом, все известные системы контроля футеровок основаны на измерении электрических параметров, которые отражают состояние тиглей.

Глава III

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПЛАВКА В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

1. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАВКИ

Металлургические процессы, протекающие в индукционных печах, существенно отличаются от процессов в вагранках и электродуговых печах.

Как известно, в основе металлургических процессов в плавильных печах лежит взаимодействие между фазами: металлом, футеровкой, шлаком и газом.

Рассматривая индукционную плавку во взаимодействии этих фаз, можно отметить, что развитие реакций между компонентами газовой, жидкой и твердой фаз не может быть интенсивным, так как температура основной фазы — шлака не достигает значений, при которых он имеет высокую активность. В индукционных печах футеровка, шлак и газ нагреваются от металла, а не от источника теплоты, как в вагранке и дуговой печи. Кроме того, в индукционных печах поверхности контакта между металлом и шлаком, металлом и газом незначительны. Поверхность контакта между шлаком и металлом можно увеличить путем интенсификации перемешивания, что достигается применением переменного тока промышленной частоты, а также подводом тока к верхним секциям индуктора, например, в некоторых тигельных индукционных печах при десульфурации. Скорость движения металла в тигле промышленной частоты: в центре 2,5 м/с, у стенки 4 м/с.

Некоторые особенности во взаимодействии фаз имеются в канальной печи. Здесь температура шлака и газовой фазы выше, чем в тигельных печах, и приближается к температуре металла, но относительное количество этих фаз, когда печь работает как накопитель, настолько мало, что они не могут обеспечить заметного протекания реакций. Незначительная реакционная способность шлака обуславливается еще и тем, что на практике

стремятся получить температуру перегрева более низкую, чем, например, в вагранках и дуговых печах. Эта тенденция обусловлена стремлением увеличить срок службы футеровки.

В индукционных печах, хотя и вяло, протекают реакции окисления примесей чугуна. Так же как и в других плавильных агрегатах, на границе раздела расплав—газ протекают реакции окисления примесей кислородом воздуха. Анализами газовой фазы над расплавом в тигельной печи обнаружено до 6% SO_2 [18]. Следовательно, сера безусловно окисляется. Интенсивность окисления зависит от длительности перемешивания ванны, плотности шлакового покрова над зеркалом металла и доступа кислорода воздуха к зеркалу металла. При закрытой крышке доступ кислорода незначителен.

Часть окислов примесей взаимодействует с футеровкой печи. Это подтверждается изменением состава рабочего слоя футеровки за период кампании тигля. Обнаружено, что в футеровке индукционных печей содержание окиси (Fe_2O_3) и закиси (FeO) железа в сумме повышается с 0,3 до 15—20%, а содержание закиси марганца (MnO) со следов до 10%. Окислившийся кремний переходит в шлак, содержание его в шлаке достигает 60—65% (табл. 21).

21. Химический состав шлаков индукционных и дуговых печей, %

Печь	SiO_2	MnO	FeO	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	CaF_2	S_2
Индукционная емкостью 12 т	68,88	6,9	0,78	2,05	6,32	2,38	8,82	1,37	0,10
Дуговая ДЧМ-10	10—26	0,15—3,93	0,9—3,09	—	—	51—62	10,3	—	0,13—0,49

Тепловым балансом индукционной плавки также подтверждается окисление примесей по приходу теплоты в результате экзотермических реакций, которое достигает 10% [14].

Как упоминалось выше, при плавке металла в индукционных печах взаимодействуют четыре фазы. Обозначим их буквами: твердая футеровка *A*, жидкий металлический расплав *B*, жидкий шлак *C*, газовая фаза *D*. Между компонентами фаз протекают химические реакции и образуются жидкие и твердые растворы. Взаимодействие может протекать между компонентами в пределах одной фазы и между фазами [18].

Согласно теории соединений можно определить количество возможных взаимодействий:

$$C_m^n = \frac{m!}{n! (m - n)!}.$$

Принимаем $m=4$ и $n=1; 2; 3; 4$, тогда

$$\sum C_m^n = C_1^1 + C_1^2 + C_1^3 + C_1^4 = 4 + 6 + 4 + 1 = 15.$$

Таким образом, возможны пятнадцать комбинаций: одинарные, двойные, тройные, четверные [12]:

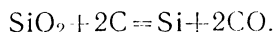
I — A, B, C, D

II — AB, AC, AD, BC, BD, CD

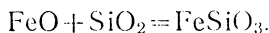
III — ABC, ABD, ACD, BCD

IV — $ABCD$

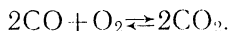
К I типу взаимодействий относятся химические реакции или взаимное растворение компонентов в пределах одной фазы. Например, в набивной футеровке тиглей, состоящей из смеси кварца с борным ангидридом, при спекании образуется боросиликатное вещество (взаимодействие A). В металлическом расплаве протекает реакция между углеродом и включениями кремнекислоты:



С повышением температуры твердый углерод растворяется в железе (взаимодействие B). В шлаке образуются силикаты (взаимодействие C):



В газовой фазе дожигается CO (взаимодействие D):



К наиболее развитым металлургическим взаимодействиям, безусловно, относятся взаимодействия II типа. Они протекают на границе раздела двух смежных фаз, имеющих большую поверхность контакта, чем во взаимодействиях III и IV типов. Максимальную интенсивность имеют следующие взаимодействия II типа: AB , футеровки с металлическим расплавом; AC , футеровки с жидким шлаком; BC , металлического расплава со шлаком; CD , шлака с газовой фазой. Большинство реакций, относящихся к приведенным выше типам взаимодействий, хорошо изучено и изложено в курсах теории металлургических процессов.

Взаимодействия III типа более сложны. Первое взаимодействие ABC одновременно трех фаз — футеровки, металлического расплава и шлака, а также третье, ACD — футеровки, шлака и газовой фазы, могут иметь постоянный или временный характер, так как поверхность контакта переменная, зависящая от взаимного перемещения фаз. Взаимодействия ABD — футеровки расплава и газовой фазы и BCD — расплава, шлака и газовой фазы, имеют временный характер и зависят от перемешивания и полноты шлакового покрова.

Взаимодействие IV типа наблюдается только в отдельных случаях, когда в контакт вступают одновременно все четыре фа-

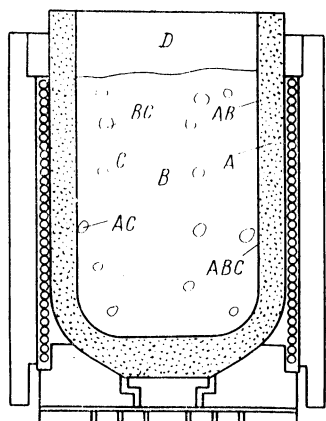


Рис. 44. Схема взаимодействия фаз в индукционной тигельной печи промышленной частоты

зы: футеровка, расплав, шлак и газовая фаза, $ABCD$.

Интенсивность химических реакций в металлургических процессах возрастает с повышением температуры, увеличением концентрации компонентов и усилением диффузии, возрастающей для данных компонентов с увеличением поверхности контакта. Направление реакции определяется константой равновесия реакции.

Для индукционной тигельной плавки с кислой футеровкой и низкой частотой, учитывая вышензложенное, имеют существенное значение взаимодействия по типу I — A, B, C, D ; по типу II — AB, AC, BC и по типу III — ABC (рис. 44).

Взаимодействия $AD, BD, CD, ABD, ACD, BCD$ и $ABCD$ в связи с незначительным содержанием в газовой фазе D свободного кислорода, особенно при закрытой крышке, существенного значения не имеют.

Во взаимодействиях A, AB, AC, ABC большое значение имеет взаимодействие A спекания кварца с борным ангидридом, ведущее к увеличению пористости стенки тигля. Пористость в дальнейшем способствует диффузии металлического расплава в стенку тигля по взаимодействию AB . Наличие этого процесса подтверждается составами исходной и отработанной масс кварцита (табл. 22).

22. Состав футеровочной смеси из Первоуральского кварца, %

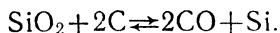
Состояние футеровочной массы	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	B_2O_3	TiO_2	MnO	RO_2
Исходный состав . . .	98,05	0,9	0,30	—	0,35	0,25	—	—	—	0,15
Отработанная масса . . .	65,64	6,72	4,96	12,33	1,39	1,24	0,4	0,2	7,02	0,25

Опыты показали, что после 250 плавов насыщение стенок рабочей зоны тигля может достигать: окисью магния 20%, закисью марганца 12% и окисью железа 32%. Окись магния, вероятно, появляется при переплаве возврата, модифицированного магнием чугуна.

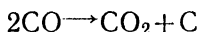
При плавке в тиглях с кислой кварцитовой футеровкой в ре-

зультате взаимодействий AC и ABC в зоне шлакового пояса образуются настывы шлака, которые трудно удалить. Обычно они образуются, когда температура расплава не превышает 1450°C . Настывы могут быть большой величины, что затрудняет завалку шихты и выдачу жидкого металла. Удалить их можно путем расплавления, повысив температуру выше 1500°C , но это сопряжено с интенсивным износом стенок тигля. Можно «сравить» настывы содой, которую насыпают на настыв, но при этом возможно разъедание футеровки.

Для предупреждения образования настывов рекомендуется способ, заключающийся в обработке кварцита перед набивкой тигля раствором соединений хрома, хромового ангидрида (Cr_2O_3) или углекислого хрома. Для этого зерна кварцита смачивают раствором соединений хрома и затем высушивают. При такой обработке соединения хрома уменьшают смачиваемость зерен кварцита расплавленным шлаком. Необходимо иметь в виду, что хромовый ангидрид ядовит. Применение неочищенной загрязненной шихты с неметаллическими примесями: окисью алюминия, кремнеземом, окисью магния (Al_2O_3 ; SiO_2 ; MgO), увеличивает количество шлака и способствует образованию настывов. При взаимодействии AB могут протекать реакции восстановления кремния углеродом металлического расплава:

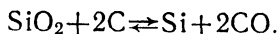


Оксид углерода проникает в стенку, достигает витков индуктора и в результате реакции



образовавшийся сажастый углерод может вызвать короткое замыкание витков индукторной катушки. В рабочей зоне футеровки обнаруживаются также окислы железа, марганца и магния, которые проникают в нее в результате диффузии из металлического расплава. При взаимодействии AC основные окислы шлака (закись марганца, оксид кальция, оксид магния, окислы железа) вступают в реакцию с кислым оксидом футеровки — кремнеземом (SiO_2) с образованием силикатов, растворяющихся в толще футеровки и, кроме того, образующих настывы. Все взаимодействия, в которых участвует фаза A (футеровка), протекают при температуре выше 1450°C .

Взаимодействия B и BC протекают следующим образом. Непосредственно в металле по взаимодействию B идут реакции его компонентов с включениями окислов и растворенным кислородом. Важное значение имеет реакция



Равновесная температура этой реакции $\sim 1420^{\circ}\text{C}$. При температуре ниже равновесной реакция идет в сторону окисления

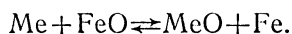
кремния, а выше — восстановления кремния; соответственно углерод восстанавливается или окисляется.

При индуктивном перемешивании раздробленные частицы шлака имеют в сумме большую поверхность контакта с металлическим расплавом, и, когда эти частицы нагреваются до температуры металла, возможны реакции по взаимодействию *BC*. Это взаимодействие приобретает существенное значение при высоком содержании в шлаке окислов железа. Такой шлак получается при плавке окисленной чугунной стружки, а также при плавке тонколистовой стали.

При доводке химического состава в металлическом расплаве усвоение углерода, кремния, марганца и хрома зависит от того, как вводятся присадки — в какой период плавки и при какой температуре. Карбюризатор для науглероживания металлического расплава вводят с шихтой или в жидкий расплав. При мелких фракциях карбюризатора его лучше вводить с твердой шихтой в упаковке (мешках или кулях). Это обеспечивает меньшие потери мелких частиц карбюризатора в окружающее пространство. Карбюризатор в крупных гранулах можно вводить в жидкий металл, так как выноса его не будет.

Ферросилиций, ферромарганец и феррохром лучше вводить после присадки карбюризатора, так как окисление их в раскисленном металле будет меньше. Такое же значение имеет окисленность твердой металлической шихты: чем больше окислов на шихте, тем сильнее окисляются примеси.

Судя по низкому содержанию в шлаке окислов железа (см. табл. 21), окисление примесей чугуна по взаимодействию *BC* развивается слабо. Взаимодействие *BC* протекает по реакции



Взаимодействие *D* внутри газовой фазы подтверждается наличием в ней, например SO_2 , (см. табл. 29). Под крышкой над расплавом взаимодействия не могут получить заметного развития из-за недостатка в печной атмосфере свободного кислорода, поэтому не происходит дожигания CO .

2. УГАР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, НАУГЛЕРОЖИВАНИЕ

Угар при индукционной тигельной плавке, кроме известных факторов: температуры, концентрации, состава и качества шлака, зависит также от частоты тока. С понижением частоты, а следовательно, с увеличением интенсивности перемешивания, угар увеличивается (табл. 23).

Общий угар на кусковой шихте составляет 1,6%: на шихте со стальной стружкой — 0,3—6,2%, на шихте с чугунной стружкой — 5,3—9,0% [10]. С чугунной стружкой вносится больше окислов железа, поэтому окисление примесей расплава идет интен-

23. Изменение содержания химических элементов расплава в зависимости от частоты тока [21]

Частота тока, Гц	Угар [—] и пригар [+], %			
	C	Si	Mn	Cr
2 100	—11,3	+5,85	—14,9	—3,49
100 000	0	—0,255	—9,1	—1,58

свинец. Проведены эксперименты по плавке окисленной и неокисленной стружки [10]. В шихту вводят до 60% стружки. Результаты по окислению примесей приведены в табл. 24.

24. Угар химических элементов при разной степени окисленности стружки, %

Качество стружки	C	Si	Mn	Общий
Неокисленная	10,7	8,2	6,3	7,4
Окисленная	23,0	21,5	18,0	16,2

Угар марганца и кремния не зависит от времени выдержки, а зависит от температуры расплава. Угар марганца меньше при одновременном вводе с кремнием и не превышает 18%. Угар хрома увеличивается с понижением температуры, при 1365° С он равен 31,8%, при 1470° С — 5,5%. Общий угар кремния не превышает 25% содержания его в расплаве.

При вводе в расплав электродного боя усвоение его составляет 80—85%. Скорость науглероживания при 1400—1470° С достигает 0,12%/мин. При фракциях до 10 мм и вводе электродного боя в шихту усвоение может достигать 90%. Ниже приведена скорость науглероживания расплава, %/мин, различными материалами:

Графит искусственный в зернах	10,3
Гранулированный графит	9,0
Электродный уголь	8,4
Древесный уголь	7,3
Термоантрацит	7,2
Нефтяной кокс	7,2

Как видно, хуже всего усваиваются высокозольные, легкие и прочные карбюризаторы. При науглероживании температура расплава понижается на 50° С на каждый 1% усвоенного углерода.

При 1420—1460° С скорость усвоения кремния 0,1%/мин, при содержании кремния в металле до 0,5%. Высококремнистые до-

25. Состав шихты, шлака и угар химических элементов в печах
LFD-12 и ИЧТ-6 при плавках № 44, 47, 20

Температура, состав шихты и шлака и угар элементов	LFD-12		ИЧТ-6
	№ 44	№ 47	№ 20
Температура расплавов, °C	1420	1480	1550
Состав шихты, %:			
зумпф	15,3	23,75	39,59
возврат	30,7	36,32	—
чугун передельный	24,8	24,97	—
стальной лом	22,2	13,87	—
чугунная стружка	6,0	—	—
ферросилиций ФС45	1,0	1,09	1,9
слитки — возврат	—	—	39,72
феррофосфор ФФ	—	—	1,67
медь М1	—	—	4,6
ферромарганец Мп 6	—	—	0,39
феррохром ФХ800	—	—	1,62
никель Н4	—	—	10,51
графит в зернах	120 кг	104 кг	26 кг
Состав шлака, %:			
окись кремния SO_2	52,54	56,5	69,92
окись кальция CaO	6,86	8,3	1,82
закись марганца MnO	4,57	10,1	9,05
закись железа FeO	10,0	5,0	2,63
окись железа Fe_2O_3	15,0	15,0	10,11
фосфорный ангидрид P_2O_5	0,04	0,1	0,037
окись алюминия Al_2O_3	—	5,0	1,98
сера S_2	0,035	0,035	0,01
окись магния MgO	—	—	0,43
хромовый ангидрид Cr_2O_3	—	—	2,07
закись никеля NiO	—	—	1,91
Угар элементов, %:			
углерод	2,0	1,06	2,9
кремний	5,25	1,27	5,18
марганец	5,09	4,75	11,5
хром	—	—	1,16
никель	—	—	0,12
фосфор	2,8	1,1	—
железо	0,24	0,1	0,8
сера	9,2	2,0	0,38

бавки следует вводить при температурах не ниже 1400° С, тогда усвоение можно принимать 100%. Марганец усваивается из Mn5 80—90% со скоростью 0,1 %/мин. Хром усваивается при 1420° С—0,18%/мин. При большом науглероживании, например при выплавке на стальном ломе синтетического чугуна, необходима выдержка чугуна в тигле с целью улучшения распределения и измельчения включений графита. Такую выдержку называют термовременной обработкой. Термовременная обработка нужна для перераспределения атомов углерода, которое происходит довольно трудно, так как решетка графита разрушается только при 4000° С.

В табл. 25 приведены составы шихт для трех плавов в тигельных индукционных печах LFD-12 и ИЧТ-6, составы шлака и угар в расплаве.

Проведенные опытные плавки показали влияние температуры перегрева, концентрации и состава шихты на угар примесей (см. гл. V). Угар углерода, марганца и железа наибольший при температуре перегрева 1550°С. Угар хрома практически отсутствует при содержании его в металле до 0,2% и имеет заметную величину при содержании 1,92% (табл. 26).

26. Химический состав чугуна при опытных плавках, % (см. табл. 25)

№ плавки	C	Si	Mn	Cr	S	P	Ni	Cu
44	3,73	1,72	0,85	0,17	0,025	0,062	—	—
47	3,85	2,00	0,90	0,148	0,024	0,064	—	—
20	2,70	2,09	0,74	1,92	0,26	0,48	16,7	7,0

Угар углерода, кремния, марганца и железа возрастает с увеличением содержания стального лома в шихте и с применением чугунной стружки.

Усвоение элементов при плавке в индукционных печах рекомендуется принимать по данным, приведенным в табл. 27.

Окисление компонентов шихты особенно заметно при плавке стального лома в индукционных печах. В состоянии красного каления (540°С—1100°С) стальная стружка и стальной лом подвергаются сильному окислению и газонасыщению, поэтому загрузка стального лома и стальной стружки в жидкий расплав при выплавке чугуна способствует значительному снижению угара. Например, на одном из заводов из тигля емкостью 6 т выдают каждый раз только по 450 кг металла и после этого вводят твердую сталь в жидкий металл. При большом зумпфе, к тому же, удлиняется служба огнеупоров. Необходимо учитывать, что при выплавке стали с целью уменьшения количества неметал-

лических включений следует повышать уровень металла в тигле для того, чтобы уменьшить интенсивность перемешивания на поверхности расплава.

27. Усвоение химических элементов из присадок в индукционных печах

Элемент	Материал присадки	Усвоение, %
C	Графит в зернах	90
Si	Ферросилиций ФС45	100
Mn	Ферромарганец Мн-6А	80
Cr	Феррохром ФХ800	75
Ni	Никель Н4	100
Cu	Медь М1	100
Mo	Ферромolibден ФМ2	80
P	Феррофосфор ФФ	70

3. ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ

В индукционных тигельных печах промышленной частоты с кислой футеровкой возможно обессеривание металла [18]. Процесс десульфурации в них отличается от рафинирования в электродуговых печах. В дуговых печах реакции десульфурации протекают между активным основным шлаком и металлом, а в индукционной печи между твердыми частицами карбида кальция или цианамидка кальция и металлом при интенсивном перемешивании расплава. Для усиления перемешивания расплава иногда подают напряжение на верхнюю катушку. Для десульфурации применяют карбид кальция в гранулах 0,5—5 мм, пылевидный карбид кальция для этой цели непригоден (табл. 28). Известно, что с увеличением в шлаке от 9,5 до 34% карбида кальция содержание серы в металле уменьшается с 0,012 до 0,0035% и коэффициент распределения серы повышается с 20 до 100.

Для десульфурации цианамид кальция (CaCN_2) должен иметь следующий состав: 55—62% CaCN_2 ; 0,2—0,6% CaC_2 ; 20—25% CaO ; 2—4% SiO_2 ; 2—6% ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$); 11—12% C. Температура разложения цианамидка кальция 1400°C. Разложение идет по реакции



Образующийся кальций имеет высокую активность, углерод создает восстановительную атмосферу, а вместе они усиливают десульфурующую способность процесса. Лучшие результаты получают при вспененном твердом шлаке, после затвердевания

28. Нормы расходы карбида кальция при обессеривании

Исходное содержание серы, %	Расход карбида кальция для десульфурации на 60—80% [% от массы металла]	Прирост кремния, %
0,12	1,7—2,0	0,07—0,15
0,10	1,6—1,8	0,05—0,12
0,08	1,8—1,6	0,04—0,09
0,06	1,4—1,5	0,03—0,08

такой шлак представляет собой пористую массу. Хорошие результаты были достигнуты на шлаковой смеси: 74—77% цианмида кальция (CaCN_2), 18—20% силикатной глыбы (Na_2SiO_3) и 5—6% плавикового шпата (CaF_2). Количество вводимой смеси составляло 0,8—1% от массы металла. Такие результаты получают только при условии, если шлак хорошо перемешивается с металлом, поэтому плавку ведут на нижних первой и второй катушках индуктора, а десульфурацию на верхней третьей катушке.

В тиглях, в которых не проводится десульфурация, третья катушка (верхняя) холостая (без напряжения).

Уменьшение содержания серы начинается через 5 мин после загрузки смеси и длится в течение 25—30 мин, после чего наступает равновесие реакции десульфурации. Ниже приведена динамика снижения содержания серы в металле при десульфурации:

Выдержка со шлаком, мин	5	10	15	20	25	30	35	40
Содержание серы, %	0,04	0,034	0,027	0,018	0,010	0,01	0,015	0,025

Важно после десульфурации быстро скачивать шлак, так как сера после выдержки 30 мин будет восстанавливаться. Состав шлака после десульфурации:

Компоненты . . .	SiO_2	CaO	FeO	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaF_2	Al_2O_3	Na_2O	S_2
Содержание в шлаке, % . .	35,58	44,62	0,3	0,4	0,5	3,6	6,68	6,7	0,87	0,75

Коэффициент распределения серы достигает 75.

Температура, при которой ведут десульфурацию, должна быть умеренной — 1480—1500°C.

Усиленное разъедание футеровки тигля при десульфурации наблюдается в виде пояса на уровне шлака. Разъедание, которое за неделю достигает по глубине пояса 60 мм и шириной до 80 мм, зависит от полноты удаления шлака с зеркала металла. Для ремонта разъеденной части футеровки используют кварцевую массу, замешанную на жидком стекле.

В составе газовой фазы при десульфурации цианамидом кальция содержание циана находится в пределах санитарных норм (табл. 29).

В индукционных печах можно провести дегазацию. Это достигается выдержкой чугуна при температуре 1400—1450° С.

В табл. 30 приведены содержания газов в ваграночном чугуне и чугуне индукционной плавки при одинаковом химическом составе чугуна и одинаковом углеродном эквиваленте, равном 4,03.

29. Содержание вредных газов при десульфурации цианамидом кальция, мг/м³

Составляющие газовой фазы	Содержание в печном газе	Санитарная норма
CN	0,055	0,5
CO	19,3	20,0
SO ₂	5,8	10,0
NH ₃	0,021	20,0

30. Содержание газа в чугуне после плавки, %

Чугун	O ₂	N ₂	H ₂
Ваграночный	0,0055	0,0058	0,00028
Индукционной плавки	0,0027	0,0073	0,00020

В результате выдержки жидкого чугуна в тигле содержание кислорода в 2 раза меньше, чем в ваграночном чугуне, меньше также содержание водорода.

В индукционных тигельных печах высокой частоты индуктивное, перемешивание слабое, поэтому взаимодействие фаз, участвующих в процессе, менее интенсивное. Из-за низкого содержания свободного кислорода над зеркалом металла в тигле можно пренебречь взаимодействиями с участием газовой фазы *D, AD, BD, CD, ABD, BCD, ACD* и *ABCD* и взаимодействиями при низкой температуре расплава *C, AC* и *BC*. Существенное значение имеют только взаимодействия *A, B, AB* и *ABC*. Схема взаимодействий для индукционных печей высокой частоты представлена на рис. 45. Взаимодействия *A, B, AB* и *ABC* протекают так же, как и в печах промышленной частоты, но с меньшей интенсивностью из-за слабого индуктивного перемешивания при токе высокой частоты. По этой причине десульфурацию в печах высокой частоты не применяют.

Индукционные каналные печи в режиме выдержки отличаются от тигельных печей тем, что расплав изолирован от внешней среды, газовая фаза постоянная, почти нет шлака, и перемешивание происходит менее интенсивно. Из всех приведенных взаимодействий в этих печах возможны только *A, B* и *AB*. Также из-за малого содержания кислорода в газовой фазе (табл. 31) невозможны взаимодействия *D, AD, BD, CD, ABD, BCD, ACD, ABCD*. Из-за низкой температуры и незначительного количества

шлака невозможны взаимодействия C , AC , BC и ABC . Схема взаимодействий в канальной печи показана на рис. 46. В футеровке ванны и индуктора протекают взаимодействия A . Компоненты расплава растворяются по взаимодействию AB . Футеровка частично оплавляется, о чем свидетельствуют присутствующие в шлаке Al_2O_3 и MgO (табл. 31).

31. Химический состав шлака и газов в канальной печи

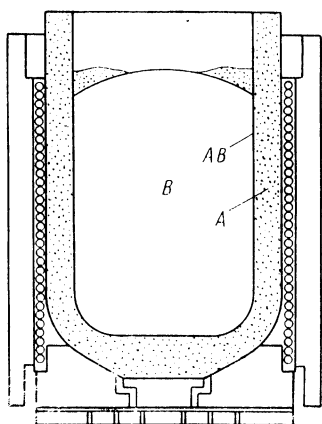


Рис. 45. Схема взаимодействия фаз в индукционной тигельной печи высокой частоты

Шлак из канальной печи		Газ под крышкой канальной печи	
Состав	Количество, %	Состав	Количество в полной печи (0,25 печи), %
SiO_2	24,2	$\Sigma CO_2 SO_2$ и NH_3	12,5 (3,0)
Al_2O_3	17,1	O_2	0,2 (0,2)
CaO	4,2	CO	51,3 (18,4)
MgO	11,02	$H_2 + C_n H_m$	1,0 (2,4)
MnO	4,25	N_2	35,0 (16,8)
Fe_2O_3	2,91		
FeO	6,24		
C	0,08		
S_2	0,01		

Скачивание шлака производят один раз в две недели, за это время его накапливается около 40 кг при общей емкости печи 57 т, что составляет всего 0,07%. Присутствующие в шлаке окислы попадают в печь при заливке, а также образуются вследствие незначительного окисления кремния, марганца и железа. Практического значения такой угар не имеет, так как масса окислов незначительна и на химический состав не влияет. Существенное влияние на результат оказывает взаимодействие B , протекающее в расплаве металла. В отличие от других плавильных агрегатов (вагранки, дуговых и тигельных печей) в канальной печи происходит обеднение металла центрами кристаллизации, кремнеземом и графитом. Это также подтверждает состав шлака, в котором низкое содержание кремнезема и высокое — углерода. Обеднение кремнеземом происходит в результате реакции восстановления кремния: $SiO_2 + 2C \rightleftharpoons Si + 2CO$, которая при температуре выше $1420^\circ C$ идет вправо. Следовательно, чем выше температура, тем меньше остается центров кристаллизации. Так же действует выдержка: чем она больше, тем меньше остается

зародышей. В результате этих процессов происходят изменения в чугунах. Графит приобретает форму точечного и междендритного, что является результатом переохлаждения из-за малого содержания зародышей фазы в металлическом расплаве. В основной металлической массе преобладает феррит, количество которого может достигать 80—90% (рис. 47).

Таким образом, при повышении температуры выше 1420°C и увеличении времени выдержки сильнее проявляются указанные

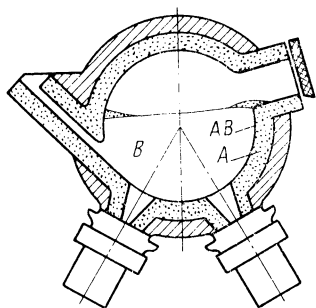


Рис. 46. Схема взаимодействия фаз в индукционной канальной печи промышленной частоты

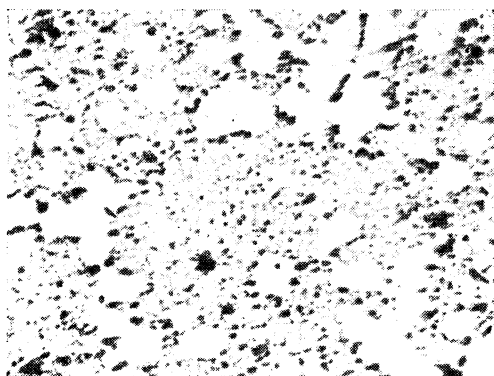


Рис. 47. Микроструктура чугуна из канальной индукционной печи

явления, в результате чего механическая прочность чугуна понижается. Для примера в табл. 32 приведены механические свойства чугуна при плавке дуплекс-процессом: вагранка производительностью 30 т/ч, индукционная канальная печь емкостью 45 т.

Качество металла может быть улучшено модифицированием его при выпуске из канальной печи и ограничением температуры

32. Свойства чугуна, полученного из вагранки и из канальной печи при температуре выпуска 1410°C

Плавильный агрегат	Состав, %		Механические свойства по стандартным образцам кгс/мм ²		Структура чугуна	
	C	Si			Графит	Матрица
			σ_B	HB		
Вагранка	3,75	2,02	20,1	188	Г-4-5	Ф-10-20
Канальная печь	3,75	2,20	17,7	176	Г-1-2	Ф-70-85

выпуска 1450°C. Лучшие результаты дают продувка металла воздухом в ковше через пористое дно, модифицирование оловом (0,08—0,1%) и 75%-ным ферросилицием (0,3%). В первые недели после пуска канальной печи (с заново футерованными индукторами) на режим выдержки в дуплекс-процессе с вагранкой или другими плавильными печами наблюдается изменение физических свойств металла, в частности жидкотекучести. Жидкотекучесть при том же химическом составе чугуна и температуре перегрева, что и в других плавильных печах, понижается на 25—30% и составляет 80—85 см.

Жидкотекучесть понижается вследствие насыщения расплава взвешенными твердыми частицами окиси магния, образовавшейся в результате эрозии еще неснекшейся футеровки стенок каналов. Подобное понижение жидкотекучести наблюдается в заэвтектических серых чугунах, когда избыточный углерод выделяется в жидком сплаве в виде графита. Факт эрозии футеровки подтверждается большим содержанием окиси магния в шлаке (см. табл. 31). По мере спекания стенок индуктора жидкотекучесть повышается до нормальных значений — 110—120 см. В начальном периоде для устранения эрозии футеровки необходимо выдержку вести на первой-второй ступенях трансформатора. Угар примесей в канальной печи практически равен нулю. Например, за 12 ч выдержки содержание углерода не изменяется, за последующие 30 ч выдержки — снижается не более чем на 4%. Содержание остальных химических элементов остается без изменения.

4. ПЛАВКА ЧУГУНА

В индукционных печах ведут плавку чугуна моно- и дуплекс-процессами. Процесс выбирают в зависимости от исходной шихты, заданного качества, назначения и количества жидкого металла.

Моно-процесс заключается в ведении плавки с начала и до конца на твердой завалке в одном агрегате: тигельной или канальной индукционной печи. Широкое применение получила плавка в тигельных печах промышленной частоты. Плавку на твердой завалке в канальной индукционной печи применяют очень редко и в основном при потребности металла ~10 т/ч. Для таких плавок канальные печи строят большей мощности, чем печи, работающие на жидкой садке.

Канальные печи для плавки на твердой шихте могут быть рентабельны при расплавлении легированной стружки, так как в них можно получить минимальный угар, при котором потери стружки не более 8% [41]. Недостаток канальных печей состоит в том, что надо оставлять металл в каналах. По этой причине лучше вести непрерывный процесс на большом зумпфе без смены марки чугуна. При этом используются преимущества каналь-

пой печи: незначительный угар железа и примесей, меньшая потребляемая мощность по сравнению с тигельными и дуговыми печами, минимальная вредность, а также безопасность в работе, стабильность химического состава и температуры металла.

Например, фирма «Chrysler» применила для выплавки на твердой завалке чугуна с шаровидным графитом для коленчатых валов индукционную канальную печь промышленной частоты барабанного типа емкостью 100/25 т (100 т полезных). Шихта состоит из стального лома и очищенного от пригоревшего песка оборотного металла. В печи установлены четыре индуктора мощностью по 1100 кВ·А, а, например, на печах выдержки таких индукторов ставят один или два. Производительность печи 10 т/ч. В основном же при плавке чугуна каналные печи применяют как печи выдержки в дуплекс-процессах и как заливочные устройства емкостью до 5 т на автоматических формовочных линиях.

Моно-процесс плавки чугуна ведут в тигельных индукционных печах на низкой, средней и высокой частотах. При плавке на низкой частоте необходимо иметь остаток жидкого металла от предыдущей плавки не менее 10—15% садки или пусковой слиток в твердом состоянии той же массы. В такой печи можно также расплавлять без зумпфа и слитков куски шихты толщиной не менее 200 мм. В этом состоит трудность плавки на низкой частоте. В тигельных индукционных печах промышленной частоты можно расплавлять крупногабаритную шихту, например, вальцы (рис. 48), масса которых 6 т, диаметр 700 мм, длина

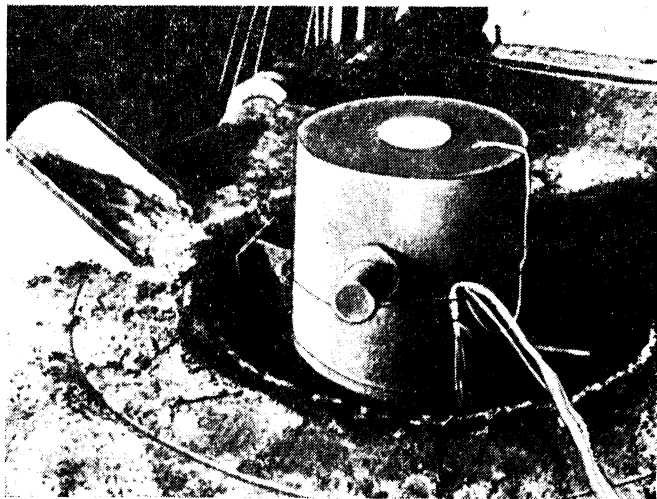


Рис. 48. Расплавление прокатного вальца массой 6 т в тигельной индукционной печи

2200 мм, а также крупные пакеты стального лома. Часто с этой целью применяют тигли емкостью 60 т и более. Можно расплавлять негабаритные материалы без разделки, например, рельсы, балки. На средней (600—800 Гц) и высокой (2000 Гц и более) частотах расплавление начинают без зумпфа и слитков.

Для индукционной плавки применяют шихту в холодном, подсушенном и нагретом состоянии.

Плавка на холодной шихте сопряжена с опасностью выброса металла при попадании влажной шихты, а в зимнее время шихты со снегом. Особенно опасно применение холодной шихты при плавке с большим зумпфом, когда каждая завалка производится в жидкий металл. Подсушка до температуры выше 100°C предусматривает удаление влаги и подогрев материалов, в том числе и ферросплавов: ферросилиция, феррохрома и др. Подогрев шихты до 500—800°C и выше имеет целью сокращение времени на расплавление и значительное повышение производительности плавильной печи.

Наиболее трудной задачей является подготовка к плавке чугунной стружки. Чугунная стружка на машиностроительных заводах часто загрязняется машинным маслом и охлаждающими жидкостями. Для обезжиривания стружки серого и ковкого чугунов можно применить обжиг, но при нем стружка окисляется и имеет место значительный угар железа. Необезжиренная стружка для применения ее в индукционной печи может быть предварительно переплавлена в слитки. Этот способ применяют на Автогазе при выплавке чугуна типа пирезист с высоким содержанием никеля и меди. После механической обработки эту стружку, содержащую более 10% смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), расплавляют в дуговой электропечи и разливают в слитки массой по 3 т, которые служат шихтой в плавильных печах ИЧТ-6. Возвратный металл, литники, бракованные отливки, сливы перед плавкой необходимо очищать от пригоревшего песка в проходных барабанах, чтобы сократить количество шлака, облегчить таким образом работу со шлаком и увеличить долговечность футеровки. Вопросы подогрева шихты рассмотрены в гл. V.

Плавки с пусковым слитком на тиглях промышленной частоты, как правило, после тепловой выдержки в нерабочие дни начинают с завалки твердой шихты на всю высоту тигля. Порядок завалки следующий: на пусковой слиток загружают литники, на них чугунную стружку и карбюризатор, который можно использовать в таре (мешках, кулях и т. п.), затем подают легковесную часть шихты, например стальную высечку, часть возврата и другую кусковую шихту до верха тигля. После загрузки включают напряжение, начиная с низких ступеней: 2-ю, затем 3-ю и через некоторое время после разогрева шихты переходят на высшие ступени. Иногда из-за неплотной укладки шихты расплавление не начинается. Чтобы начать плавку, можно

прибегнуть к заливке в загруженный тигель жидкого чугуна из соседних печей.

При плавке необходимо следить за опусканием шихты. Для осаждения шихты использовать груз массой 1,5—2 т, подвешенный на крюк крапа. Бывают случаи, когда над зумпфом после расплавления пускового слитка образуется мост и, если шихту не осаживать, вышележащий металл не будет плавиться, а в зумпфе жидкий расплав будет перегреваться. В результате возможно оплавление футеровки и даже авария — проедание пода или стенки тигля.

Загрузка на пусковой слиток литников и на них чугушной стружки россыпью предупреждает образование мостов. По мере расплавления загружают остальную часть шихты. После полного расплавления скачивают шлак. Затем обеспечивают перегрев и присадку легирующих элементов, берут пробу на химический состав, заливают клин и печь переводят на 3—4-ю ступень для выдержки. Загрузку шихты и скачивание шлака следует выполнять при выключенном положении печи. В зависимости от конструкции печи шлак скачивают через шлаковый желоб в шлаковину с помощью счищалки или ложки для снятия шлака (рис. 49). Хорошо служит и не обрастает шлаком ложка, выточенная из остатков графитовых электродов дуговых печей. Удобно снимать шлак ложкой, насаженной на штангу, через ролик, установленный на переносной подставке.

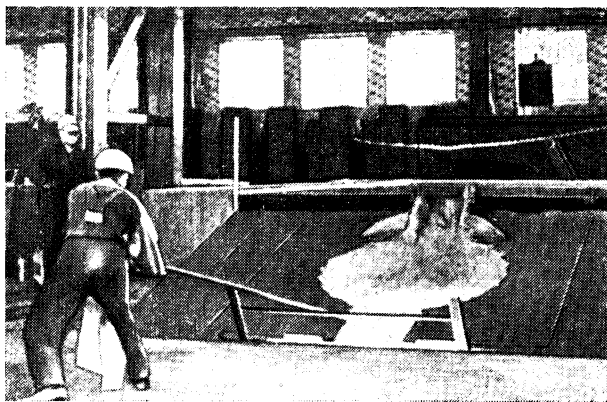


Рис. 49. Удаление шлака из тигельной печи

Готовый металл может быть выдан полностью или до зумпфа (15—20% емкости тигля), или же частично (не более 25—30% полного тигля). Способ выдачи выбирают в зависимости от назначения и требуемого количества металла. Полностью плавку выдают при окончании кампании тигля, перед его выбивкой или перед тепловой выдержкой в длительное нерабочее вре-

мая, а также при периодической плавке. Это имеет место, например, при изготовлении крупных отливок из специальных чугунов при единичном и серийном производстве.

При непрерывном процессе в условиях конвейерного производства и автоматических линий часто применяют частичную выдачу металла (20—30% садки) и завалку твердой шихты в расплав.

В Швеции на одной из фирм плавку в тигле емкостью 25 т ведут в ночное время, когда тариф на электроэнергию ниже дневного, а в первой и второй сменах разливают металл по конвейерам. Суточная потребность металла 50 т, поэтому готовят два тигля по 25 т. При каждой выдаче металла тигель наклоняют, не возвращая в исходное положение, только к концу второй смены он будет в горизонтальном положении. При такой плавке наблюдается износ футеровки передней стенки тигля.

При плавке в индукционных печах необходимо вести контроль за шихтовкой, мощностью и ходом плавки по времени. Для контроля служат приборы, показания которых записывают в журнале плавки. Наиболее полный контроль достигается при взвешивании прессдукторами. Диаграмма прессдуктора одной из плавок на тигельной печи емкостью 12 т представлена на рис. 50. Этот график и записи в журнале плавки последовательности загрузки шихты в тигель дают полное представление о ходе процесса. Направление записи на графике указано стрелкой.

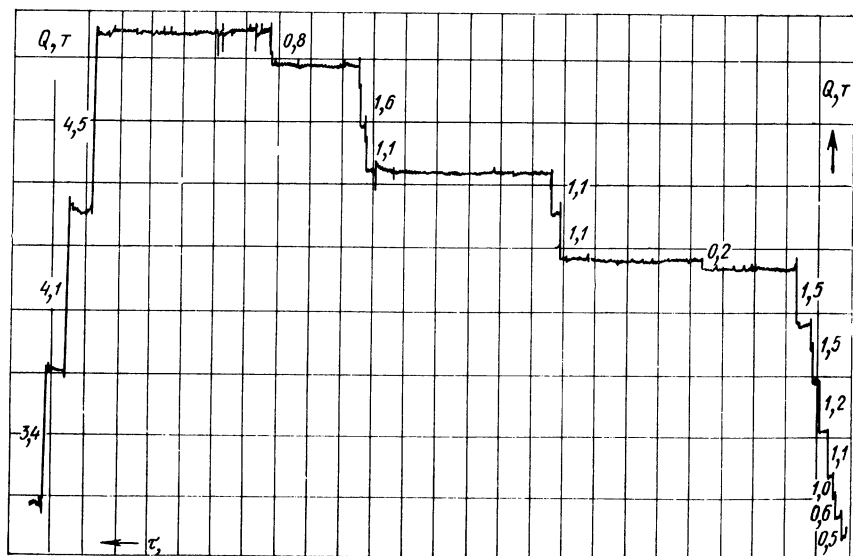


Рис. 50. График плавки в индукционной печи — загрузка шихты и выдача жидкого металла по прессдуктору

цифрами указаны массы загруженной шихты и выданного металла.

Ниже приведен состав шихты (т), загруженной по графику плавки, показанному на рис. 50:

Зумпф	0,5
Сталь легковесная	$\left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ 1,1 \\ 1,2 \end{array} \right.$
Стружка чугунная россыпью	0,6
Сталь тяжеловесная	$\left\{ \begin{array}{l} 1,5 \\ 1,5 \end{array} \right.$
Ферросплавы ФС45	0,2
Возврат	$\left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ 1,1 \\ 1,1 \end{array} \right.$
Чугун доменный передельный	1,6
Стружка чугунная россыпью	0,8
Итого	13,3

По окончании плавки выдано из печи три ковша металла: 1-й — 4,5 т, 2-й — 4,1 т и 3-й — 3,4 т.

Все перечисленные операции по загрузке шихты и выдаче металла зафиксированы на диаграмме прессдуктора. Операции по завалке шихты и выдаче металла выполняли при выключенном напряжении, поэтому на графике они имеют вид прямых вертикальных линий, а плавка — горизонтальных линий. По графику общая продолжительность плавки равна 5,5 ч, из них плавление заняло 5 ч. Нормальная продолжительность плавки на этих печах 3 ч. Увеличение продолжительности приведенной плавки на 2 ч произошло из-за малого зумпфа (всего 6%) и увеличения садки до 115%.

Пример плавки в индукционной тигельной печи емкостью 12 т с большим зумпфом приведен в табл. 33.

Полное время, затраченное за плавку, составляет 2 ч 35 мин, температура металла была доведена до 1450°C.

Применение индукционной плавки рационально при дешевой шихте, состоящей из металлоотходов: стального лома, стальной и чугунной стружки. Использование доменного чугуна необходимо исключить полностью или допускать не более 10%. Чугун, выплавленный на металлоотходах с доведением его состава присадками карбюризатора и ферросплавов, принято называть синтетическим. Выплавка синтетического чугуна отличается от выплавки обычного чугуна только тем, что больше затрачивается времени на расплавление легковесной шихты. Пример плавки синтетического чугуна приведен в табл. 34.

Плавку вели на 6-й ступени трансформатора с 8 ч 42 мин до 11 ч 43 мин, затем до конца на 7-й ступени. Продолжительность плавки 5 ч 35 мин.

При плавке синтетического чугуна, когда присаживают около 60% С от общего содержания, необходима выдержка распла-

Время	Операция и материал	Масса, т
8 ч 30 мин	Начало загрузки: зумфи возврат собственного производства стальной лом чугунная стружка россыпью чугун переделный	5,0 2,4 1,8 0,7 1,0
8 ч 45 мин	Включение печи	
9 ч 50 мин	Полное расплавление: графит в зернах ферросилиций ФС45 ферромарганец Мн5	0,06 0,035 0,025
10 ч 30 мин	Выдержка: Возврат собственного производства	2,0
10 ч 40 мин	Полное расплавление	—
10 ч 55 мин	Скачивание шлака	—
11 ч 20 мин	Выключение печи	—

ва 20—25 мин в области температур 1440—1460°C для образования благоприятной формы и размеров включений графита. Другие элементы следует присаживать с учетом их склонности к окислению. Кремний вводят при температуре около 1450°C, когда он не окисляется, фосфор, никель, ванадий и медь — в любое время, так как они не окисляются. Марганец и хром, алюминий и титан вводят перед выпуском, так как они подвержены окислению. Установлено, что чугун индукционной плавки больше, чем ваграночной, склонен к переохлаждению с образованием междендритного графита, а в некоторых случаях к отбелу, поэтому при выпуске его подвергают модифицированию 0,3%-ным ФС45 или редкоземельными металлами.

5. ПЛАВКА ДУПЛЕКС-ПРОЦЕССОМ

Применение дуплекс-процессов для плавки в двух различных плавильных агрегатах целесообразно при полном использовании преимуществ каждой печи, таких как энергетические, теплотехнические, эксплуатационные, экономические и др. При плавке в вагранке к.п.д. при расплавлении достигает 60%, а при перегреве всего 5%, в индукционной печи при плавке к.п.д. низкий, не более 20%, а при перегреве высокий, около 60% [17]. Следовательно, соединение вагранки с индукционной печью дает явные преимущества в использовании тепловой энергии. Кроме

34. Последовательность операции при плавке синтетического чугуна

Время	Материал	Масса, кг
	Зумпф	2500
8 ч 42 мин	Возврат собственного производства	500
8 ч 47 мин	Графит в зернах	60
	Стальной лом	300
8 ч 52 мин	Чугунная стружка	700
	Стальной лом	300
8 ч 55 мин	Чугунная стружка	700
	Стальной лом	300
9 ч 36 мин	Чугунная стружка	700
	Стальной лом	300
10 ч 10 мин	Чугунная стружка	700
	Стальной лом	300
10 ч 58 мин	Возврат собственного производства	1300
11 ч 43 мин	Графит в зернах	40
11 ч 53 мин	Сталь пакетная	500
12 ч 00 мин	Графит в зернах	40
12 ч 15 мин	Сталь пакетная	500
12 ч 27 мин	Графит в зернах	40
12 ч 30 мин	Сталь пакетная	400
12 ч 45 мин	Графит в зернах	40
12 ч 46 мин	Сталь пакетная	500
13 ч 30 мин	Сталь-пакеты	400
13 ч 57 мин	То же	600
13 ч 58 мин	Ферросилиций ФС45	160
14 ч 04 мин	То же	100
14 ч 17 мин	Первая проба	—

того, в индукционных печах можно получить металл более точного химического состава и более стабильную температуру, чем в вагранках и дуговых электропечах.

При плавке дуплекс-процессом в дуговых электропечах можно расплавлять крупногабаритный лом со значительным содержанием неметаллических материалов, а также проводить рафинирование расплава. Дуплекс-процесс позволяет более полно использовать возможности плавильного агрегата. Например, вагранка приобретает особенности, полнее удовлетворяющие ее

основную функцию — плавление металла. Перегрев чугуна не требуется, поэтому процесс можно вести на более низких температурах, что позволяет сократить расход кокса. Так как науглероживание проводят в индукционной печи, то в вагранке можно при нормальном расходе кокса (12%) выплавлять чугун на шихте с большим содержанием стального лома. Известно, что для получения из вагранки при моно-процессе чугуна с нормальным содержанием углерода при высоком (до 30—50%) содержании стали в шихте, расход кокса в целях науглероживания должен быть не менее 25%.

Имеется несколько разновидностей дулекс-процессов с использованием индукционных печей, основные из которых следующие: вагранка с канальной индукционной печью, вагранка с тигельной индукционной печью, тигельная индукционная печь с дуговой электропечью, тигельная индукционная печь с канальной индукционной печью, дуговая электропечь с тигельной индукционной печью, дуговая электропечь с канальной индукционной печью.

Дулекс-процесс выбирают в зависимости от предъявляемых требований к качеству и количеству металла. Металл из одного плавильного агрегата в другой может передаваться непрерывно по желобу, при помощи крановых ковшей, а также ковшами на электрокаре.

Применение дулекс-процессов экономически эффективно, если достигается повышение качества металла по химическому составу и температуре, удешевляется шихта благодаря использованию отходов металла, сокращается численность обслуживающего персонала и удлиняется кампания печей. Ниже рассмотрены возможные варианты использования индукционных печей в дулекс-процессе.

Дулекс-процесс вагранки с канальной печью. Этот вид плавки широко распространен в Европе и США. В последние годы его начали применять в СССР. Он внедрен на ЗИЛе, Автогазе и других заводах. Применение его целесообразно там, где требуются большие количества однородного металла, например в крупных литейных цехах автомобильной и тракторной промышленности.

Вагранка обеспечивает непрерывный выпуск металла, что невозможно в индукционной печи. Канальная печь дает чугун постоянного химического состава и температуры, при этом емкость канальной печи должна соответствовать двухчасовой производительности вагранки, что позволяет усреднять химический состав ваграночного чугуна, имеющего колебания по содержанию углерода и кремния до 0,5% и более.

При таком дулекс-процессе к присадкам ферросплавов в канальную печь, как правило, не прибегают и пользуются печью как миксером. Ферромарганец и графит в зернах можно присаживать на передаточный желоб или в ковш. Ферросилиций рас-

воряется плохо, поэтому его необходимо присаживать в плавильный агрегат. Присадка стали или ферросплавов через окно в крышке нежелательна, так как вызывает увеличение количества шлака и понижение стойкости футеровки. Учитывая, что стойкость футеровки ванны печи более двух лет и индуктора более года, канальная печь получила широкое признание как хорошо обеспечивающая функции накопления и тепловой поддержки металла.

Для того чтобы в канальной печи получить металл высокого качества, необходимо поддерживать количество расплава в ней не менее 2/3 объема, так как только при этом условии будет получено достаточное усреднение химического состава и температуры. Металл из вагранки в канальную печь лучше передавать непрерывно по желобу, при таком способе облегчается обслуживание и можно уменьшить численность персонала. Длина желоба должна быть не более 6 м, при большей длине необходимы укрытие и газовые подогреватели.

В большинстве случаев в дуплекс-процессе применяют две вагранки, работающие попеременно с одной канальной печью. Есть установки с одной вагранкой и одной канальной печью, при этом вагранка непрерывно работает в течение недели, в нерабочие дни ее ремонтируют и снова запускают в работу на следующую неделю. Такая плавка стала возможной благодаря применению безфутеровочных водоохлаждаемых вагранок, на ремонт футеровки которых требуется немного времени. Часто, однако, ставят вторые стволы вагранок, учитывая, что загрузочные устройства, воздухонагреватели, охладительные установки при двух вагранках остаются в том же количестве, что и при одной. Во избежание настылей на желобе лучше непрерывно выпускать металл из вагранки и передавать его в канальную печь. Шлак из вагранки необходимо отделять, для чего используют устройства сифонных леток или переднего горна. Чем больше попадает ваграночного шлака в канальную печь, тем сильнее подвергается разъеданию футеровка приемного сифона и, следовательно, чаще приходится его ремонтировать.

При плавке дуплекс-процессом чугуна ваграночная шихта в отличие от обычной должна иметь высокое содержание стального лома. Расход доменного чугуна должен быть не более 10%. Это обеспечивает снижение себестоимости и компенсацию затрат на дуплекс-процесс.

Ниже приведен примерный состав шихты (%) при дуплекс-процессе вагранки с канальной печью:

Доменный чугун	10
Стальной лом	40
Возврат собственного производства	46
Ферросилиций ФС18	4
Итого	100

Расход кокса при плавке в вагранке колеблется в пределах 8—12%, при меньшем расходе необходимо проводить науглероживание графитовой крошкой или другим карбюризатором на желобе при передаче металла в канальную печь. Температура выпуска металла из вагранки должна быть не ниже 1360°C, в канальной печи обеспечивают перегрев металла. Производительность полной печи LFR-CSH-45/12 при перегреве от 1400 до 1500°C составляет 65 т/ч. Обычно выдержку проводят на 1-й или 2-й ступени трансформатора при потребности до 20 т/ч металла. Практически из канальной печи выдавать металл нужно при температуре 1400—1420°C, так как при более высокой температуре неизбежно его перерождение по структуре, как указано выше. Шлак из канальной печи, работающей в дуплекс-процессе, скачивают через боковое окно не чаще одного раза в две недели.

Особенно внимательно необходимо наблюдать за режимом охлаждения печи, так как нарушение его может привести к аварии. Температура воздуха на выходе из катушек индуктора должна быть не выше 100°C, а температура воды не выше 70°C. При аварийных состояниях охлаждающую воду можно отключать не более чем на 20 мин. Вопросы водоснабжения рассмотрены в гл. VI.

При выпуске из канальной печи жидкий металл необходимо модифицировать путем подачи в струю 0,3% ФС75 и 0,1% графита в зернах. Модифицирование устраняет нежелательное перерождение структуры чугуна. Металл можно выпускать в крановый ковш, в ковш электрокары и непосредственно в заливочное устройство. Последнее очень удобно, так как устраняется перелив металла.

Дуплекс-процесс вагранки с тигельной индукционной печью. Этот процесс сравнительно мало распространен. Например, на одной из фирм в Швеции дуплекс-процессом вагранки с кислой футеровкой емкостью 8 т с тремя тигельными индукционными печами низкой частоты емкостью 5 т выплавляют высококачественный чугун с шаровидным графитом. В индукционных печах проводят десульфурацию ваграночного чугуна карбидом кальция. Содержание серы уменьшается с 0,08 до 0,015% в течение 5 мин.

Применение такого дуплекс-процесса целесообразно только в том случае, если необходимо рафинирование или легирование чугуна, так как в тигельной печи низкой частоты можно провести десульфурацию, а также легирование с меньшими потерями на угар ценных примесей. В тигельной печи также можно провести термовременную обработку и получить более благоприятную форму графита.

Дуплекс-процесс тигельной печи с дуговой печью. Такой вариант процесса применяют в том случае, когда требуется глубокая десульфурация. На Автогазе этот процесс используют для изготовления коленчатых валов автомобильных двигателей из

чугуна с шаровидным графитом. Для плавки применены тигельные индукционные печи промышленной частоты LFD-12, а для рафинирования металла дуговые печи ДЧМ-10 с основной футеровкой. Металл передается крановым ковшом емкостью 5 т. В результате применения дуплекс-процесса расход доменного чугуна уменьшен до 10—15% и может быть исключен полностью. Благодаря автоматизации управления процессом плавки индукционную работающую печь обслуживает один плавильщик.

В дуговую печь жидкий металл из кранового ковша емкостью 5 т заливают под заранее загруженную на под печи смесь флюсов: восемь частей комовой извести и две части плавильного шпата ФК-92, общая масса смеси должна составлять 5—6% массы полной садки в печь жидкого металла. Далее, на образовавшийся шлак забрасывают раскислительную смесь [19]; под шлаком металл выдерживают 40—60 мин, содержание серы при этом уменьшается до 0,002%.

На рис. 51 показано изменение содержания серы в металле при дуплекс-процессе индукционной печи с дуговой печью на Автогазе [19]. В индукционной печи содержание серы 0,0177%, а по окончании десульфурации в дуговой печи всего 0,002%.

До внедрения дуплекс-процесса металл для коленчатых валов плавил моно-процессом в дуговой печи. В результате перевода на дуплекс-процесс себестоимость жидкого металла снизилась на 31 руб.

Дуплекс-процесс тигельной печи с канальной печью. Этот вид дуплекс-процесса целесообразно использовать для накопления больших количеств жидкого металла при плавке в тигельных индукционных печах и ведения непрерывной заливки на конвейерах и автоматических линиях. Применяют его на ВАЗе и

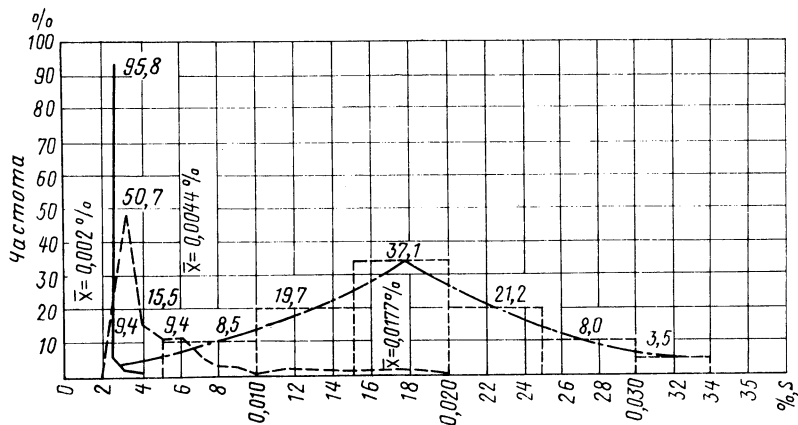


Рис. 51. Кривые распределения содержания серы в металле при выплавке высокопрочного чугуна дуплекс-процессом:

..... индукционная печь; ———— дуговая печь, предварительный анализ; ————— дуговая печь, маркировочный анализ

Автогазе. Таким процессом можно выплавлять сплитический чугун на базе стального лома и чугунной стружки, если имеется возможность обеспечения металлоломом.

На ВЛЗе таким способом выплавляют серый чугун Gh-26, химический состав которого, %: 3,31 C; 2,44 Si; 0,47 Mn; 0,12 Cr; 0,13 Ni; 0,045 Sn; 0,016 S. Для плавки установлены индукционные тигельные печи LFD-25, а в качестве миксера канальная печь LFR-D (A, R) M-45.

Состав шихты (%) при дуплекс-процессе тигельная — канальная индукционная печь ¹:

Возврат собственного производства	44,6
Чугун литейный	15,0
Стружка чугуная	15,4
Стальные отходы (пакеты)	12,6
Отходы кузнечного производства	10,8
Ферросилиций ФС45	1,3
Ферромарганец дробленый Мнб	0,1
Феррохром кусковой ФХ650	0,2
Графитовая стружка	1,0
Графит в зернах	1,21

Шихту загружают цилиндрической бадьей емкостью 6 т. Бадья имеет открывающееся дно. Каждую бадью загружают по расчету шихты. Последовательность загрузки шихты: сухая чугунная стружка, графитовая стружка и ферросплавы, чушковый чугун, пакетированные стальные отходы, отходы кузнечного цеха и возврат собственного производства. Когда от загруженной порции остается не расплавленным только верхний слой шихты, загружают вторую порцию, затем через каждые 30 мин загружают третью, четвертую порции и т. д. После расплавления всей садки берут пробу для определения полного химического состава и углеродного эквивалента; получив результаты химического анализа скачивают шлак и при необходимости доводят химический состав. Готовый металл по желобу переливают в индукционную канальную печь. Из тигельной печи выливают 20 т металла в канальную печь и оставляют 5 т зумпфа. Можно также перелить 6 т металла в канальную печь и затем загрузить в плавильную печь 6 т твердой шихты. Из канальной печи выдачу металла в ковш на заливку ведут непрерывно. Периодически контролируют химический состав и температуру металла из канальной печи.

При заполнении ковша металлом из канальной печи проводят модифицирование, добавляя в струю мерными стаканчиками модификаторы, состоящие из разных комбинаций, в зависимости от требований к отливкам, ферросилиция ФС75, силикокальция и гранулированного графита.

¹ За 100% принято содержание составляющих в металлозавалке.

На Автогазе осуществлен подобный дулекс-процесс индукционных тигельных печей LFD-25 и канальных печей LFR-CSH-45. Отличие его состоит в том, что шихту предварительно нагревают до 500°C в газовом нагревательном устройстве. Металл из тигельной печи передается в канальную печь крановым ковшем емкостью 5 т, а из канальной печи крановыми ковшами емкостью 1,5 т к заливочному устройству. Выплавляется чугун СЧ 18-36, модифицирование производится 0,3% ФС75 и 0,1% графита при температуре выпуска 1420°C.

Дулекс-процесс дуговой печи с тигельной индукционной печью. Этот процесс применяют для переплавки крупногабаритного стального лома с большим количеством неметаллических материалов. На ВАЗе таким процессом выплавляют ковкий чугун, блочный чугун и чугун с шаровидным графитом. Установлена дуговая печь фирмы «ASEA» LBSH-48 емкостью 40 т, время плавления 40-тонной садки 3,5 ч. В индукционной печи LFD-25 выдерживают металл и при необходимости присаживают ферросплавы. Индукционная печь на режиме выдержки работает спокойно на нижних ступенях трансформатора (как правило, на 3-й и 4-й).

Дулекс-процесс дуговой печи с индукционной канальной печью. При таком процессе канальная печь служит миксером для хранения и выдержки металла, что позволяет накапливать металл в нерабочее время. Для этого в плавильном агрегате ведут плавку в ночные часы или в перерывы на обед. Качество металла зависит от наполнения канальной печи. При полной печи раскиснение по содержанию углерода достигает 0,08% и кремния 0,05%. При периодическом опоражнивании печи до 1/3 получаются большие отклонения: по углероду до 0,15% и кремния до 0,14% (табл. 35).

В процессе плавки в индукционных печах ведут наблюдение за состоянием футеровки. Футеровка постепенно изнашивается, поэтому во избежание ее проедания необходимо своевременно прекратить плавку и поставить печь на ремонт. В индукционных тигельных печах повреждение футеровки или ее износ определяют по сигналу. Существующие конструкции сигнализаторов подробно описаны в гл. II. Косвенными показателями износа футеровки являются увеличение садки, потребляемой мощности и реактивной мощности, повышение температуры охлаждающей воды до 80°C, а также износ стенок тигля более 30%, выявляемый обмером тигля.

По износу футеровки наиболее опасны индукторы канальной печи, поэтому в процессе плавки следят за состоянием футеровки каналов. Канал имеет как активное, так и реактивное сопротивление. С увеличением поперечного сечения канала активное сопротивление его уменьшается. Реактивное сопротивление канала повышается с увеличением среднего расстояния между

35. Анализ металла при дулекс-процессе тигельная—канальная
индукционные печи LFD-25 и LFR-CSH-45

Время	Состав, %					
	C	Si	Mn	Cr	S	P

Полная печь

8 ч	3,65	2,20	0,70	0,14	0,034	0,07
8 ч 30 мин	3,68	2,20	0,67	0,14	0,020	0,064
9 ч	3,68	2,20	0,68	0,15	0,034	0,070
9 ч 30 мин	3,73	2,18	0,69	0,14	0,034	0,070
10 ч	3,70	2,22	0,72	0,15	0,034	0,072
10 ч 30 мин	3,65	2,20	0,70	0,14	0,028	0,070
11 ч	3,68	2,22	0,68	0,15	0,032	0,07
11 ч 30 мин	3,60	2,18	0,66	0,15	0,032	0,065
12 ч	3,70	2,20	0,67	0,13	0,034	0,072
12 ч 30 мин	3,60	2,20	0,67	0,14	0,030	0,070
13 ч	3,65	2,20	0,67	0,14	0,034	0,072
13 ч 30 мин	3,65	2,23	0,70	0,15	0,030	0,070

С периодическим опорожнением

16 ч	3,68	2,15	0,96	0,16	0,082	0,084
16 ч 30 мин	3,60	2,20	0,88	0,15	0,074	0,092
17 ч	3,63	2,27	0,90	0,15	0,075	0,091
17 ч 30 мин	3,68	2,20	0,83	0,15	0,072	0,094
18 ч	3,68	2,18	0,79	0,15	0,080	0,092
18 ч 30 мин	3,68	2,19	0,84	0,14	0,072	0,091
19 ч	3,70	2,26	0,86	0,15	0,078	0,098
19 ч 30 мин	3,75	2,13	0,75	0,15	0,092	0,098
20 ч	3,65	2,20	0,75	0,16	0,080	0,098
20 ч 30 мин	3,65	2,15	0,86	0,16	0,080	0,096

каналом и обмоткой индуктора и понижается с приближением канала к обмотке катушки индуктора, поэтому о состоянии футеровки канала судят по величине активного и реактивного сопротивлений, определяемых в одно и то же время. При этом пользуются специальной диаграммой, представленной на рис. 52.

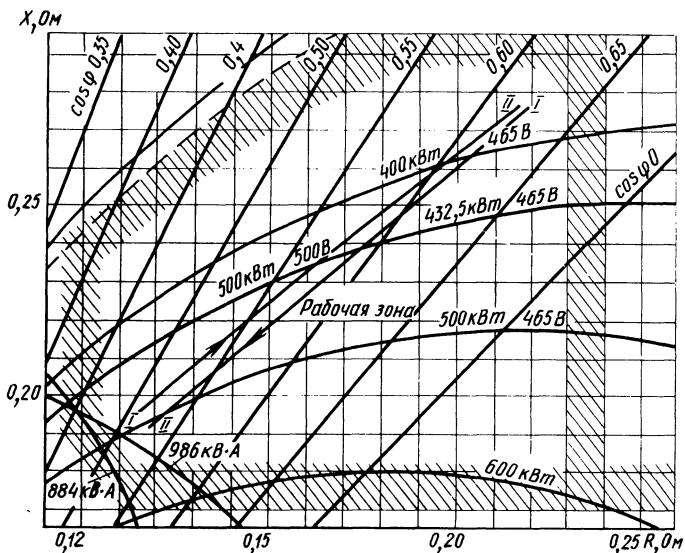


Рис. 52. Диаграмма для определения состояния футеровки индуктора каналной печи. Заштрихованные зоны показывают необходимость замены индуктора. I, II — точки замсра соответственно R и cos φ

Показания приборов снимают не реже одного раза в неделю, причем каждый раз на одной и той же высокой ступени трансформатора (например, при нагреве на 4-й или 5-й ступени) при одинаковом химическом составе и температуре металла в печи 1420°С. Отклонения по температуре допускаются не более ±3%. Результаты заносят в журнал по специальной форме.

Форма

Показатели тепловой и электрической работы индуктора

Дата	Время, ч	Температура входящей воды, °С				Температура выходящей воды, °С				Температура металла, °С	Номер индуктора	Ступень трансформатора	Напряжение, В	Сила тока, А	Активная мощность, кВт	Активное сопротивление, Ом	Реактивное сопротивление, Ом	Примечание
		Индуктор		Охлаждение рамы		Индуктор		Охлаждение рамы										
		1	2	1	2	1	2	1	2									

Если известны напряжение, сила тока и активная мощность, то активное R и реактивное X сопротивления (Ом) определяют по формулам

$$R = \frac{P}{I^2} \text{ или } R = \sqrt{\left(\frac{U^2}{I} + X\right)\left(\frac{U^2}{I} - X\right)};$$

$$X = \frac{\sqrt{U^2 - \left(\frac{P}{I}\right)^2}}{I},$$

где P — активная мощность, Вт; I — сила тока, А; U — напряжение, В.

Точки на диаграмме можно наносить по значениям активного сопротивления R и $\cos \varphi$, так как подсчет реактивного сопротивления X занимает много времени. При этом $\cos \varphi$ берут не по показаниям прибора, а по подсчету

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}.$$

Величины активного и реактивного сопротивлений наносят на диаграмму: R — по оси абсцисс, X — по оси ординат. Точка пересечения характеризует состояние футеровки. На каждой точке, полученной таким методом, ставят дату проверки, а следующие точки соединяют между собой с пометкой стрелкой направления движения. Если активное и реактивное сопротивления уменьшаются непрерывно и равномерно, то идет нормальный износ, т. е. канал расширяется и приближается к катушке индуктора, если же они увеличиваются, то канал уменьшается и удаляется от катушки, что может быть вызвано ошлакованием канала. При сужении канала сечение его можно расширить повышением температуры нагрева. Инфильтрация металла в футеровку вызывает отклонения активного и реактивного сопротивлений. Зона ограничения на диаграмме является рабочей зоной, т. е. плавка может продолжаться до тех пор, пока контрольные точки не попадут в эту зону. При низких значениях сопротивлений R и X необходимо понижать мощность, понижая напряжение, и наоборот, при высоких значениях R и X напряжение необходимо повышать. Это создает условия для нормальной работы индуктора.

Глава IV

КАЧЕСТВО ЧУГУНА ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ

1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЧУГУНОВ ИНДУКЦИОННОЙ И ВАГРАНОЧНОЙ ПЛАВОК

Одной из наиболее важных характеристик плавильного агрегата является минимальное отклонение химического состава полученного металла от заданного. Индукционные плавильные печи обладают рядом существенных предпосылок для получения чугуна заданного состава, к которым относятся пониженный угар, эффективное перемешивание ванны, периодичность плавки и возможность регулирования состава и температуры расплава. Однако в условиях массового производства эти преимущества индукционной плавки не всегда используются из-за недостаточной четкой организации весового хозяйства и отсутствия на некоторых заводах быстродействующего оборудования для химического анализа. Многие современные индукционные печи оборудуют взвешивающими устройствами (прессдукторами), рациональная эксплуатация которых позволяет установить действенный контроль за расходами металла и режимом загрузки и выдачи.

Получение чугуна необходимого химического состава зависит также от стабильности снабжения индукционных печей металлическими отходами, однородными по химическому составу. Оптимальным вариантом является обеспечение плавильного участка технологическими металлоотходами, полученными при обработке определенных марок стали и чугуна. Однако потребность в них не всегда полностью удовлетворяется, поэтому приходится использовать различные металлоотходы и применять стальную и чугунную лом разного химического состава. Разделение металлоотходов по маркам, надежность работы взвешивающих устройств и быстрота химического анализа являются основными факторами, обеспечивающими получение точного химического состава.

Для оценки точности по химическому составу делали статистическую обработку нескольких плавок чугуна СЧ 18-36, проведенных на вагранках емкостью 20 т и на тигельных индукционных печах емкостью 12 т. Шихта ваграночной плавки имела следующий состав, %:

Переделный чугун	54,8
Возврат собственного производства	27,8
Брикетируемая чугунная стружка	6,0
Сталь тяжеловесная кусковая	3,0
Ферромарганец Мнб	0,4
Ферросилиций ФС18	8,0
Итого	100

В шихту индукционной плавки входили следующие составляющие, %:

Стальные отходы	78
Возврат собственного производства	14
Чугунная стружка россыпью	8
Итого	100

В качестве стальных отходов для индукционной плавки применяли трансформаторную сталь со средним содержанием кремния 2,5%. Это позволило отказаться от использования ферросилиция. В качестве карбюризатора применяли графит в зернах, расход которого составил 12—15 кг/т чугуна. В обоих случаях для каждого из элементов определяли среднеквадратическую погрешность и доверительные интервалы при заданной надежности $\alpha=0,99$. Точки, в которых фактический интервал был больше доверительного, отбрасывали, после чего проводили вторичную обработку. Затем определяли относительную погрешность для содержания рассматриваемого элемента. Результаты статистической обработки представлены в табл. 36.

36. Результаты статистической обработки химического состава чугунов, полученных при опытных плавках, %

Показатель	C	Si	Mn	Cr	S	P
Вагранка						
Среднее содержание	3,64	2,26	0,67	0,15	0,073	0,075
Доверительный интервал	0,04	0,07	0,04	0,02	0,0015	0,0005
Относительная погрешность	1,0	3,0	5,98	13,3	20,5	6,66
Индукционная печь						
Среднее содержание	3,71	2,05	0,99	0,17	0,032	0,069
Доверительный интервал	0,04	0,15	0,05	0,01	0,004	0,003
Относительная погрешность	1,07	7,3	5,05	5,88	12,5	4,35

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы. В условиях массового производства имеются объективные предпосылки для получения в индукционных тигельных печах более точных результатов химического анализа чугуна, чем в условиях ваграночного переплава, однако для этого необходимо совершенствование методов подготовки шихты.

На рис. 53, а — в приведены частотные характеристики углеродного эквивалента, содержания фосфора и хрома в чугунах,

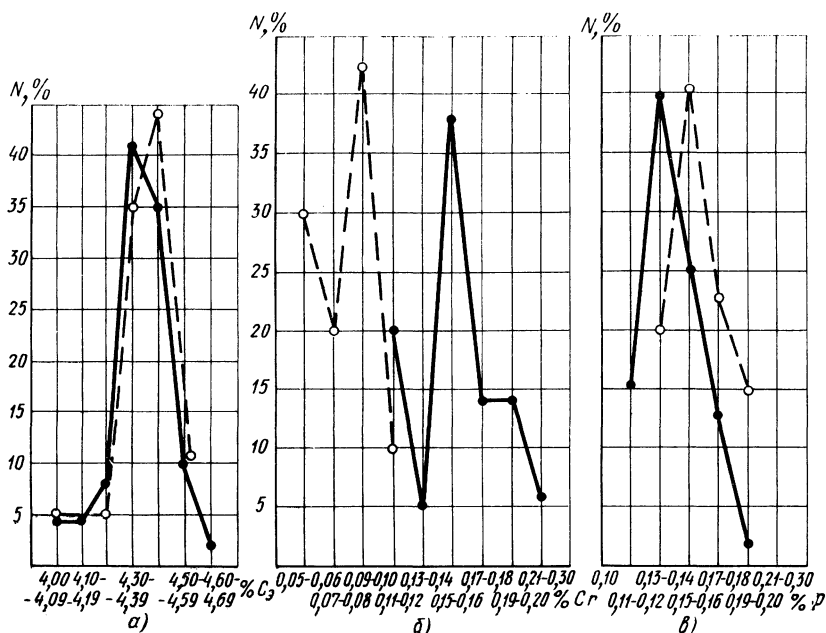


Рис. 53. Частотные характеристики:

а — углеродного эквивалента $C_3 = (C + \frac{1}{3}Si) \%$; б — содержания Cr; в — содержания P:
 ————— — индукционные печи; - - - — вагранки; N — количество случаев

полученных в индукционных печах и в вагранках. Из этих рисунков следует, что разброс химического состава чугуна в обоих случаях практически одинаков.

2. ЗАТВЕРДЕВАНИЕ, СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧУГУНОВ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ

Особенностью индукционного переплава чугуна по сравнению с ваграночным процессом является интенсивное перемешивание и более высокий перегрев металла, что обеспечивает уменьшение газосодержания в металле. Общее количество газов, растворенных в чугуне, может быть оценено следующим образом (см³/кг):

Индукционная печь	50—110
Вагранка с подогревом дутья	90—150
Вагранка на холодном дутье	200—280

Повышение температуры металла с 1255 до 1420° С приводит к уменьшению общего газосодержания примерно на 30%. Аналогичный результат получается при выдержке металла в индукционной печи, причем наибольшая эффективность наблюдается в течение первых 30 мин. Перегрев и выдержка металла в тигле

индукционной печи приводят к уменьшению количества центров кристаллизации. Этим объясняется повышение величины переохлаждения при кристаллизации. На рис. 54 показано изменение температуры переохлаждения в зависимости от углеродного эквивалента для различных плавильных агрегатов.

Величина переохлаждения чугунов индукционной плавки выше, чем ваграночных чугунов, на 40—50° С. Максимальная величина переохлаждения индукционного чугуна составила 170° С. Для сравнения можно отметить, что величина переохлаждения для железа в тех случаях, когда расплав не граничит с твердой фазой и не содержит ее, составляет 259° С [13].

При индукционной плавке в результате повышенного переохлаждения чугуна эвтектическая кристаллизация сопровождается образованием структурно-свободного цементита. Однако это не единственный фактор, определяющий склонность чугуна индукционной плавки к затвердеванию с белым изломом. Важным фактором является также химический состав чугуна. Если подсчитать константы графитизации ваграночных и индукционных чугунов на основании данных, приведенных в табл. 36, то получим у чугуна индукционной плавки константу графитизации меньше, чем у ваграночного чугуна.

Константу графитизации определяли по формуле Н. Г. Гиршовича.

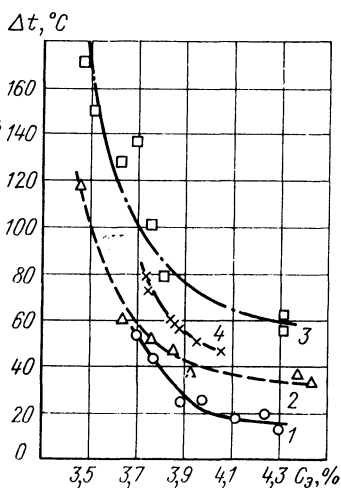
$$K_r = C [Si - 0,2(Mn - 1,7S - 0,3) + 0,1P + + 0,4Ni - 1,2Cr - 0,4Mo].$$

После подстановки данных из табл. 36 получим для индукционной плавки $K_r=6,68$ а для ваграночной $K_r=7,74$, следовательно, чугун индукционной плавки более склонен к затвердеванию с белым изломом. При этом основное значение имеет повышенное содержание хрома, как основного карбидообразующего элемента, что объясняется повышенным содержанием хрома в стальных отходах, входящих в состав шихты.

Наиболее значительным фактором при всех обстоятельствах остается количество углерода и кремния, поэтому

Рис. 54. Влияние углеродного эквивалента $C_э = C + \frac{1}{3}(Si + P) \%$ на величину переохлаждения при эвтектической кристаллизации для различных плавильных агрегатов (по В. С. Голицину):

1 — вагранка; 2 — дуговая электропечь; 3 — индукционная печь на ваграночной шихте; 4 — индукционная печь на ваграночном переплаве



с целью устранения отбела отливок при индукционной плавке необходимо выдерживать максимально возможный углеродный эквивалент, при котором обеспечиваются заданные механические свойства чугуна, причем для устранения отбела в качестве модификатора следует использовать ферросилиций. Количество вводимого модификатора подбирают практически, исходя из химического состава, температуры заливки, требуемых механических свойств и обрабатываемости металла.

К отбелу наиболее чувствительны детали, изготавливаемые с применением холодильников или состоящие из стальных узлов, заливаемых чугуном, например тормозные барабаны, состоящие из стального фланца и чугунного обода, которые на автомобильных заводах изготовляют серийно. В местах соединения фланца и обода наблюдается повышенная склонность чугуна к отбелу, что приводит к затруднениям при механической обработке и к образованию трещин при затвердевании. Для устранения этого дефекта применяют модифицирование ферросилицием путем ввода его на струю металла при переливе в ковш (0,3% ФС75 в смеси с 0,1% графита в зернах).

Повышенный перегрев, интенсивное перемешивание металла и выдержка его в тигле или в канальной печи приводят к некоторому различию в кристаллизации немодифицированных ваграночных и индукционных чугунов.

В последнем случае отмечается склонность к кристаллизации с образованием структурно-свободного цементита, измельчение графита, увеличение связанного углерода, а также склонность к образованию междендритного графита. На рис. 55, а, б показаны микроструктуры чугуна СЧ 18-36 ваграночной и индукционной плавок. Сравнение микроструктур подтверждает уменьшение включений графита в индукционном чугуне.

Для исследования особенностей графитизации синтетического индукционного чугуна измеряли электросопротивления чугуна с момента заливки до затвердевания. Так как электросопротивление пластинчатого графита в несколько раз выше сопротивления металлической основы, то можно было ожидать его по-

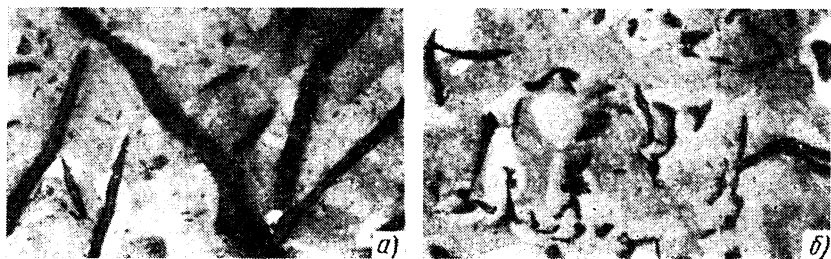


Рис. 55. Микроструктуры чугуна; $\times 500$:
а — ваграночного; б — из индукционной печи

нижения при увеличении дисперсности графита и количества связанного углерода. Испытания проводили при затвердевании в форме образца диаметром 30 мм. В сухую форму вводили стальные электроды. Электросопротивление измеряли микроомметром с момента заполнения формы жидким металлом.

Чугун СЧ 18-36 выплавляли двумя способами: в вагранке с холодным дутьем производительностью 20 т/ч и в индукционной тигельной печи промышленной частоты емкостью 12 т.

Шихта ваграночной плавки состояла из следующих компонентов: 26% Череповецкого чугуна МЗ; 25,6% Донецкого чугуна МЗ; 7,0% стальных отходов; 30% возврата собственного производства; 7% брикетированной чугушной стружки; 4,4% доменного ферросилиция ФС18; 0,6% ферромарганца ФМн0,5. На этой шихте получен чугун следующего химического состава: 3,6% С; 2,01% Si; 0,78% Mn; 0,202% P; 0,12% S; 0,09% Cr.

Шихта индукционной плавки состояла из следующих составляющих: 78% стальных отходов; 14% возврата собственного производства; 8% чугушной стружки. Химический состав полученного чугуна: 3,55% С; 2,23% Si; 0,69% Mn; 0,209% P; 0,057% S; 0,17% Cr.

Проведенные замеры показали, что электрическое сопротивление чугуна ваграночной плавки в процессе кристаллизации выше, чем индукционного чугуна (рис. 56). Следовательно, при одинаковых условиях индукционный чугун склонен к затвердеванию с большим количеством связанного углерода и более дисперсным графитом, чем ваграночный.

Установлено, что абсолютное количество связанного углерода в синтетическом чугуне индукционной плавки на 0,2—0,25% больше, чем у чугуна ваграночной плавки аналогичного состава. Рентгеноструктурный анализ, выполненный Л. В. Островерховым, показал, что наиболее грубые включения графита имеются в ваграночном немодифицированном чугуне. В чугуне индукционной плавки включения графита менее разветвленные. Эта особенность частично обусловлена более низким содержанием серы в чугуне индукционной плавки. Сера, как поверхностно-активный элемент, понижает поверхностное натяжение и способствует образованию более грубых включений графита, что и наблюдается в ваграночном чугуне по сравнению с индукционным.

Большое влияние на структуру и качество чугуна оказывает содержание газов в металле.

Водород и азот в принципе действуют однозначно, задерживая графитизацию как в эвтектическом, так и в эвтектоидном интервалах,

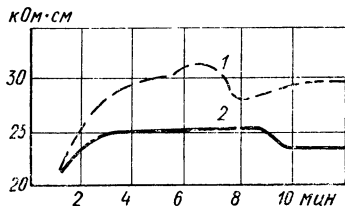


Рис. 56. Изменение электрического сопротивления ($\text{мк}\Omega \times \text{Ом}\cdot\text{см}$) ваграночного 1 и индукционного 2 чугунов в процессе затвердевания

поэтому проявляется определенная двойственность в результате их действия. С одной стороны, задерживается графитизация в эвтектическом интервале, что способствует образованию структурно-свободного цементита, с другой стороны, имеется задержка графитизации в эвтектоидном интервале, что способствует образованию перлита, а следовательно, и повышению механических свойств.

Однако иногда водород и азот способны иначе изменять указанные свойства в расплавленном металле. В присутствии нитридообразующих или гидридообразующих веществ: титана, хрома, алюминия, магния и др. [34], азот не тормозит, а, наоборот, способствует графитизации. Вероятно такая особенность и специфические условия плавки, разная наследственность шихтовых материалов, содержание в них влаги и смазочно-охлаждающих жидкостей, различная температура перегрева и время выдержки расплавленного металла приводят в некоторых случаях к диаметрально противоположным выводам.

Таким образом, чугуны индукционной плавки в принципе должны содержать меньшее количество растворенных газов, чем чугун ваграночной плавки, так как время и поверхность контакта плавящегося и жидкого металла с газовой фазой в вагранке значительно больше, чем при индукционной плавке.

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАГРАНОЧНОГО И ИНДУКЦИОННОГО ЧУГУНОВ

Механические свойства чугунов обуславливаются химическим составом, модифицированием и перегревом чугуна. Установлены следующие зависимости механических свойств индукционного чугуна от перечисленных выше факторов;

$$\sigma_b = 79,5 - 14,4(C + 0,2Si) + 3Mn + 2,5Q + 0,01\Delta t,$$

$$HB = 410 - 55(C + 0,4Si) - 2,6Mn + 0,04\Delta t,$$

где Q — количество модификатора, %; Δt — температура перегрева, °C.

В работе Л. В. Островерхова показано, что при высоком углеродном эквиваленте немодифицированные ваграночные чугуны имеют предел прочности при изгибе несколько ниже, чем немодифицированные индукционные чугуны. Но с уменьшением углеродного эквивалента прочность при изгибе немодифицированного ваграночного чугуна превышает прочность индукционного чугуна (рис. 57). Это объясняется увеличением доли междендритного графита в немодифицированных индукционных чугунах. Модифицирование улучшает свойства чугуна и при всех значениях углеродного эквивалента электропечные чугуны после модифицирования имеют лучшие механические свойства (рис. 58).

В принципе имеются предпосылки для получения индукционного чугуна с более высокими механическими свойствами, чем у

ваграночного, того же химического состава. Этому должно способствовать повышенное количество связанного углерода, более дисперсная форма графита, а также меньшее количество газов и окислов в чугунах индукционной плавки. Однако в производственных условиях из-за колебания химического состава чугуна и шихтовых материалов не всегда в полной мере проявляются указанные преимущества, что подтверждают исследования, проведенные на Автогазе. На рис. 59, а, б приведены частотные характеристики предела прочности при растяжении и твердости, которые примерно одинаковы для обоих способов плавки.

Однако возможности индукционной плавки различных марок чугунов значительно больше, чем ваграночной. Это подтверждается опытом Каунасского завода «Центролит», где в индукционных печах выплавляют чугун в широком диапазоне марок (рис. 60). При этом в чугунах с высоким содержанием углерода

стремятся выдерживать соотношение углерода и кремния, близкое к единице, а в чугунах с низким содержанием углерода — большее единицы, что достигается увеличением содержания кремния.

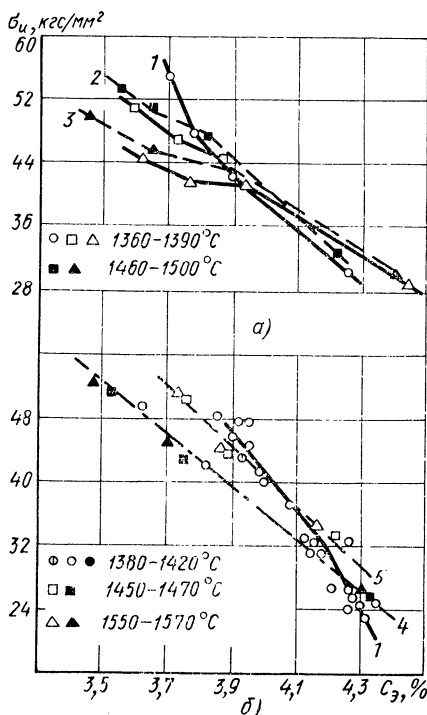


Рис. 57. Влияние углеродного эквивалента на предел прочности при растяжении серого чугуна (по В. С. Голицину):

а — при 1360–1500°C; б — при 1380–1570°C; 1 — вакуумка; 2 — вакуумка — дуговая электропечь; 3 — дуговая электропечь; 4 — индукционная печь на ваграночной шихте; 5 — индукционная печь на ваграночном переплаве

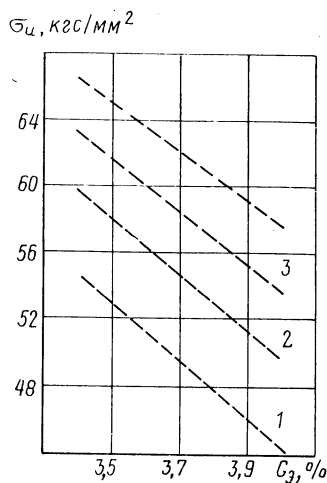


Рис. 58. Влияние углеродного эквивалента на предел прочности при изгибе (по В. С. Голицину):

1 — вакуумка; 2 — вакуумка — дуговая электропечь; 3 — дуговая электропечь

Модуль упругости чугунов в основном зависит от формы и размеров включений графита, поэтому разница между ваграночными и индукционными чугунами вполне объяснима. Так как чугуны индукционной плавки содержат более дисперсный графит, то и модуль упругости их несколько выше, чем чугунов ваграночной плавки.

Основное преимущество индукционной плавки состоит в возможности перегрева и выдержки чугуна. Именно этот фактор может оказаться решающим при оценке механических свойств чугуна. Перегрев чугуна приводит к измельчению графита, а следовательно, и к повышению механических свойств. Можно считать, что наиболее рационален перегрев выше температуры ликвидуса на 150—200°C, перегрев до более высоких температур приводит к образованию междендритной формы графита и, следовательно, к понижению прочности.

Выдержка, так же как и перегрев, увеличивает количество связанного углерода и склонность к образованию междендритного графита. Выдержка 2 ч практически не изменяет состава и свойств чугуна. При дальнейшем увеличении времени выдержки в жидком состоянии при температуре перегрева наблюдается ухудшение свойств чугуна с большим содержанием углерода. Выдержка 40—70 ч приводит к увеличению насыщения газами, что ухудшает свойства чугуна. Поведение жидкого металла при перегреве и выдержке необходимо учитывать

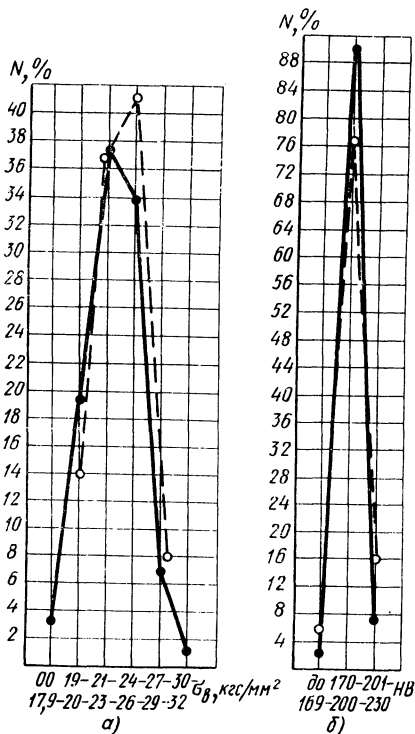


Рис. 59. Частотные характеристики:
а — твердости по Бринеллю; б — предела прочности при растяжении;
— — — индукционные печи; - - - - - вагранки

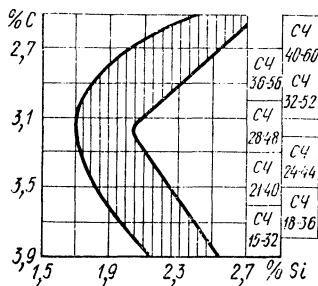


Рис. 60. Содержание углерода и кремния для чугуна разных марок Каунасского завода «Центролит»

при использовании канальных индукционных печей большой емкости, так как время выдержки металла в них может достигать значительной величины, особенно в различных аварийных ситуациях, например при остановке конвейера.

При изучении свойств чугуна СЧ 24-44, полученного дуплекс-процессами: вагранка емкостью 20 т с дуговой электропечью ДЧМ-10 и вагранка емкостью 20 т с канальной печью емкостью 47/12 т, установлено, что количество углерода в чугуне в среднем одинаково. Если для процесса вагранка — дуговая электропечь $C_{ср} = 3,31\%$, то для процесса вагранка — канальная печь $C_{ср} = 3,32\%$. Однако в последнем случае разброс результатов анализов меньше. Так, для вагранки с электропечью в интервал 3,30—3,35% С входит 68% анализов, а для вагранки с канальной печью в том же интервале по содержанию углерода приходится 72,7% всех анализов. Среднее содержание кремния одинаково во всех случаях (2,34% $Si_{ср}$), но, если вагранка работает в паре с канальной печью, то разброс анализов на кремний меньше. Если в интервале 2,25—2,40% Si при процессе вагранка — дуговая электропечь содержится 87,5% всех анализов на кремний, то для процесса вагранка — канальная печь в этом же интервале содержится 93,3%. По остальным элементам каких-либо отличий не наблюдается.

Уменьшение колебаний химического состава чугуна при работе вагранки с канальной печью привело к стабилизации предела прочности при разрыве. При $\sigma_b = 26 \div 36$ кгс/мм² для вагранки с дуговой электропечью содержится 82% результатов испытаний на разрыв, а для вагранки с канальной печью — 89%. Таким образом, канальные печи стабилизируют химический состав и, следовательно, механические свойства чугуна.

4. ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА ИНДУКЦИОННЫХ И ВАГРАНОЧНЫХ ЧУГУНОВ

Жидкотекучесть чугуна, получаемого в индукционной печи, зависит от многих факторов. Она увеличивается при повышении до некоторого предела углеродного эквивалента, температуры перегрева и времени выдержки металла. Увеличение количества ферросилиция, например, повышает вязкость металла, для понижения которой требуется последующая выдержка. Вязкость чугуна возрастает с увеличением содержания стали в шихте в результате увеличения хрома и уменьшения фосфора (см. табл. 36).

В условиях противоречивого воздействия различных факторов и многообразия условий плавки исследователи не пришли к определенному выводу.

Исследования, проведенные на Автогазе, показали, что жидкотекучесть чугуна, выплавленного в индукционных печах емкостью 12 т, равна 65—80 см по спирали. Такую же жидкотекучесть имеет чугун, выплавленный в вагранках.

Неясным остается также вопрос об усадочности чугунов индукционной и ваграночной плавки. Из-за большого количества связанного углерода можно было бы ожидать увеличения склонности к образованию концентрированных усадочных раковин, однако это в полной мере не подтверждается исследованиями. Ощутимой разницы в усадочности чугунов обоих способов плавки не обнаружено как по линейной, так и по объемной усадке и пористости. Это, в частности, подтверждается тем обстоятельством, что склонность к образованию холодных трещин у обоих чугунов примерно одинакова. Однако следует учитывать, что склонность индукционных чугунов к затвердеванию с белым изломом может в определенных условиях вызвать образование трещин в результате значительных термических напряжений.

Глава V

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ (ТЕПЛОВОЙ) И МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНСЫ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ¹

1. СТАТЬИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО (ТЕПЛОВОГО) БАЛАНСА

При работе индукционных плавильных печей энергия в основном расходуется на нагрев и расплавление шихты. Кроме того, имеется ряд статей баланса, связанных с различными потерями энергии. Это — потери энергии в индукторе в результате выделения джоулевой теплоты при прохождении тока через витки индуктора. Так как индуктор выполняют обычно из медной трубки, охлаждаемой водой, то эта энергия (теплота) и передается целиком воде, охлаждающей витки индуктора. Значительна потеря энергии (теплоты) через стенки тигля. Эта теплота также воспринимается водой, охлаждающей индуктор.

В начале кампании значительное количество энергии (теплоты) идет на разогрев стенок тигля и перекристаллизацию окиси кремния. В дальнейшем возможен расход энергии (теплоты) на нагрев внутренних слоев стенки тигля, которые могут несколько охлаждаться при выпуске жидкого металла. Потеря энергии (теплоты) происходит также с открытого зеркала металла в тигле. При установке крышки тигля эти потери уменьшаются. Потери энергии (теплоты) через дно тигля невелики, так как площадь дна мала по сравнению с поверхностью боковых стенок тигля и дно печи может быть хорошо теплоизолировано. Наконец, значительные потери энергии имеют место в трансформаторе, кон-

¹ В составлении балансов принимал участие инж. Е. Н. Чернышев.

денсаторах и проводах. По многочисленным измерениям эти потери составляют $\sim 10\%$ расхода электроэнергии печью.

Приход энергии (теплоты) в печь складывается из электроэнергии, потребляемой из сети, и энергии (теплоты), выделяющейся в тигле в результате экзотермических реакций, происходящих во время плавки чугуна.

Для того чтобы иметь представление о энергетической (тепловой) работе индукционных печей промышленной частоты для плавки чугуна, исследованы энергетические и материальные балансы печи отечественного производства ИЧТ-6 и печей LFD-12 фирмы ASEA (Швеция). Кроме того, составлены упрощенные энергетические (тепловые) балансы печи LFD-25 фирмы ASEA.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ (ТЕПЛОВЫХ) БАЛАНСОВ

Для анализа работы печи были составлены материальные балансы печей с целью определения количества окисляющихся в процессе плавки железа, углерода и других элементов, входящих в состав чугуна, для расчета количества энергии (теплоты), введенной в печь в результате экзотермических реакций.

Работу печей LFD-12 исследовали при плавке немодифицированного высокопрочного чугуна, а печи ИЧТ-6 — при плавке легированного чугуна типа нирезист (составы чугунов приведены ниже). Краткие технические характеристики печей приведены в табл. 37.

Материальные балансы плавки. Для печей LFD-12 были составлены и исследованы материальные балансы двух плавки (№ 44 и 47), для печи ИЧТ-6 — одной плавки (№ 20).

37. Краткие технические характеристики печей

Показатель	ИЧТ-6	LFD-12	LFD-25
Размеры тигля, мм:			
внутренний диаметр	1000	1190	1490
глубина (общая)	1560	2236	2800
емкость тигля (номинальная), т	6	12	25
Мощность трансформатора (номинальная), кВ·А	1190	1700	5700
Частота тока, Гц	50	50	50
Производительность (номинальная), т/ч	2,1	3,4	9,7
Мощность конденсаторной батареи, квар.	6400	12500	44800

Массу жидкого чугуна в печи перед завалкой (зумпф) и массу жидкого чугуна после плавки (перед выпуском) определяли с помощью имеющихся на печах прессдукторов — приборов, показывающих массу металла, находящегося в тигле. Эти приборы перед составлением материальных балансов были протарированы. Все остальные составляющие шихты взвешивали на цеховых весах, также предварительно проверенных. На все составляющие шихты сделаны химические анализы, приведенные в табл. 38. Полученный шлак был взвешен и сделан его химический анализ.

Анализ газов, выходящих из печи, не проводили, так как определить их объем не представляется возможным, поэтому количество окисленного углерода и других элементов находили по разности их в приходной и расходной частях баланса. Количество кислорода, использованного для их окисления, подсчитывали по соотношениям соответствующих реакций.

Материальный баланс плавки № 44. Перед началом плавки в тигле печи оставалось 1500 кг жидкого чугуна (зумпф). В печь ввели: возврата чугуна 3841 кг; пердедельного чугуна 3100 кг; стружку чугуна 770 кг; стальных отходов 2762 кг; ферросилиция 130 кг. Вместе с металлозавалкой в начале плавки было добавлено 120 кг графита в зернах, а в конце плавки 410 кг жидкого чугуна (табл. 38).

38. Анализ составляющих шихты

Составляющие	Масса, кг	Марка	Состав, %					
			C	Si	Mn	Cr	S	P
Жидкий чугун (зумпф)	1500	—	3,8	2,11	1,01	0,16	0,018	0,064
Возврат чугуна . . .	3841	ВЧ 50-2	3,58	2,20	1,122	0,16	0,002	0,062
Чугун пердедельный	3100	М2-ПА-1	4,28	0,78	0,68	0,02	0,042	0,082
Стружка чугуна . . .	770	СЧ 24-11	3,5	2,60	0,52	0,21	0,061	0,107
Сталь (отходы) . . .	2762	—	0,25	0,25	0,70	0,3	0,054	0,037
Ферросилиций . . .	130	ФС 15	0,05	42,66	0,30	0,31	0,002	—
Жидкий чугун . . .	430	ВЧ 50-2	3,58	2,25	1,21	0,22	0,002	0,064
Графит в зернах . . .	120	—	84,5	Зольа 11,75	Асфугинс 0,87	—	0,18	Влага 2,7

При этом было учтено, что с переделным чугуном, стружкой и стальными отходами введено некоторое количество влаги и масла. Содержание влаги в чугуне и стальных отходах определяли по разности массы до и после прокаливании и получили $\sim 0,4\%$. Содержание влаги и масла в чугунной стружке получили $\sim 1,0\%$. Содержание неметаллических включений в стружке отнесено в строку «Прочие». Состав жидкого чугуна, полученного после плавки, и шлака приведены в табл. 39.

39. Состав жидкого чугуна, полученного после плавки и шлака

Чугун из печи		Шлак из печи	
Состав	Количество, %	Состав	Количество, %
Fe	93,44	SiO ₂	52,54
C	3,73	CaO	6,84
Si	1,72	MnO	4,57
Mn	0,85	Feo	10,0
Cr	0,17	Fe ₂ O ₃	15,0
S	0,028	P ₂ O ₅	0,041
P	0,062	S	0,035
		Прочие	0,554

Всего получено 144 кг шлака, при этом содержание в нем чугуна было 12,95%, или 18,65 кг.

Для сведения общего баланса по кремнию в приходную часть введена графа «Песок от шихты и футеровки» — это кремний, который попадает в печь с шихтой и вследствие эрозии стенок тигля. Количество кремния, введенного таким образом в печь, определяли по разности между содержанием кремния в шлаке и количеством окисленного кремния плюс содержание его в золе.

Количество окисленного кремния (табл. 40) $Si_{\text{шихты}} - Si_{\text{чуг.}}$

$$Si_{\text{ок}} = 231,47 - (215 \pm 0,32) = 16,15 \text{ кг.}$$

Количество кремния, внесенного с шихтой и за счет эрозии стенок тигля

$$Si_{\text{вт}} = Si_{\text{шт}} - (Si_{\text{ок}} \pm Si_{\text{зол}});$$

$$Si_{\text{вт}} = 30,72 - (16,15 \pm 4,74) = 9,84 \text{ кг.}$$

В пересчете на SiO₂:

$$(SiO_2)_{\text{вт}} = \frac{9,84 \cdot 60}{28} = 21,09 \text{ кг.}$$

Материальный баланс плавки № 44 приведен в табл. 40.

40. Материальный баланс индукционной печи LFD-12 — плавка № 44

Материал	Общая масса, кг	Состав, кг								Кислород и дутье	Прочие
		C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe	H ₂ O		
Материалы, поступившие в печь — приход											
Жидкий чугун в печи (зумпф)	1500	57,00	31,65	15,15	2,40	0,27	0,96	1392,61	—	—	—
Возврат чугуна	3841	137,51	84,50	47,36	6,15	0,077	2,38	3562,91	—	—	—
Чугун переделный	3100	132,17	24,09	21,00	0,62	1,327	2,532	2906,29	12,0	—	—
Стружка чугуная	770	26,46	19,66	3,93	1,81	0,461	0,809	702,87	7,5	—	6,5
Стальные отходы	2762	6,88	6,88	19,33	8,25	1,531	1,02	2707,15	11,0	—	—
Ферросилиций	130	0,07	55,46	0,39	0,40	0,003	—	73,68	—	—	—
Жидкий чугун	410	14,68	9,23	4,96	0,902	0,08	0,260	379,96	—	—	—
Итого металлозаправка	12 513	374,77	231,47	112,12	20,53	3,677	7,961	11725,47	30,5	—	6,5
Графит в зернах	120	101,4	4,74	0,04	—	0,22	В золе 0,625	—	3,46	Дутье 1,044	3,85
Песок от шихты и футеровки	21 09	—	9,84	—	—	—	—	—	—	11,25	—
Кислород из атмосферы	41 39	—	—	—	—	—	—	—	—	41,39	—
Итого приход	12695,48	476,17	246,05	112,16	20,53	3,897	7,989	11725,47	33,96	59,074	10,33
Материалы, полученные в печи — расход											
Жидкий чугун	12 500	466,00	215,00	106,25	21,25	3,500	7,750	11680,00	—	—	—
Чугун в шлаке	18,65	0,70	0,32	0,16	0,03	0,005	0,012	17,43	—	—	—
Шлак	125,35	—	30,73	4,44	—	0,04	0,025	22,91	—	—	22,3
Газы и влага	57,8	9,47	—	—	—	0,352	—	—	33,96	14,02	—
Невязка баланса	6,32	—	—	± 1,31	— 0,75	—	± 0,199	± 5,13	—	± 0,174	— 9,97
Итого расход	12695,48	476,17	246,05	112,16	20,53	3,897	7,986	11725,47	33,96	59,074	10,33
Окисленность (угар)	—	9,47	16,15	5,71	—	0,352	0,224	28,04	—	—	—

Количество выгоревших (окисленных) в процессе плавки элементов (кг) определяют по разности между приходом и расходом:

Углерод	476,17—(466,0+0,7)=9,47
Кремний	231,47—(215+0,32)=16,15
Марганец	112,12—(106,0+0,16)=5,71
Сера	3,897—(3,5+0,005+0,04)=0,352
Фосфор	7,986—(7,75+0,012)=0,224
Железо	11725,47—(11680+17,43)=28,04

Количество кислорода, пошедшего на окисление этих элементов, приведено в табл. 41.

41. Количество кислорода, пошедшего на окисление

Окисляющийся элемент, кг	Оксид	Количество кислорода на окисление, кг	Масса оксида [газообразного], кг
9,47 С	CO	$\frac{9,47 \times 16}{12} = 12,620$	22,09
16,15 Si	SiO ₂	$\frac{16,15 \times 32}{28} = 18,460$	—
5,71 Mn	MnO	$\frac{5,71 \times 16}{55} = 1,660$	—
0,352 S	SO ₂	$\frac{0,352 \times 32}{32} = 0,352$	0,704
0,224 P	P ₂ O ₅	$\frac{0,224 \times 80}{62} = 0,288$	—
28,04 Fe	FeO	$\frac{28,04 \times 16}{56} = 8,010$	—
		Итого 41,390	

Полученное количество кислорода введено в приходную часть баланса (см. табл. 40).

Из таблицы видно, что общая невязка баланса составляет 6,32 кг или ~0,05% всего прихода или расхода. Невязки в содержании отдельных элементов очень невелики и только велика невязка в графе «Прочие», что связано с большой невязкой химического состава шлака, в котором прочие составили 10,554%, что соответствует 22,324 кг.

Материальный баланс плавки № 47 (табл. 42—45). Баланс этой плавки составлен аналогично балансу плавки № 44.

42. Количество составляющих, введенных в тигель печи, и их состав

Составляющие шихты	Масса, кг	Состав, %					
		C	Si	Mn	Cr	S	P
Жидкий чугун (зумпф) .	2800	3,75	2,20	0,95	0,13	0,014	0,065
Возврат чугуна	5100	3,55	2,24	1,22	0,185	0,002	0,066
Чугун перекдельный . .	3505,9	4,28	0,78	0,68	0,020	0,042	0,082
Стальные отходы . . .	1942,2	0,25	0,25	0,70	0,70	0,067	0,037
Ферросилиций	153	0,05	42,78	0,31	0,33	0,001	—
Жидкий чугун	540	3,63	2,24	1,20	0,17	0,003	0,060
Графит в зернах . . .	104	84,5	Зола 4,75	—	Легу- чие 0,87	0,18	Про- чие 2,70

43. Состав жидкого чугуна и шлака

Чугун из печи		Шлак из печи	
Состав	Количество, %	Состав	Количество, %
C	3,85	SiO ₂	56,5
Si	2,00	MnO	10,1
Mn	0,90	CaO	3,5
Cr	0,148	P ₂ O ₅	0,1
P	0,024	S	0,035
S	0,064	FeO	5,0
		Fe ₂ O ₃	15,0
		Al ₂ O ₃	5,0
		Прочие	9,765

Всего шлака получено 60 кг, причем чугуна в шлаке было 7,14 кг, что составляет 11,9%.

Количество окисленного кремния

$$Si = 285,59 - (281,8 + 0,143) = 3,647 \approx 3,65 \text{ кг.}$$

Количество кремния, внесенного с шихтой и за счет эрозии стенок тигля

$$Si_{\text{вп}} = 13,93 - (3,65 + 4,1) = 6,18 \text{ кг.}$$

В пересчете на SiO₂

$$(SiO_2)_{\text{вп}} = \frac{6,18 \cdot 60}{28} = 13,23 \text{ кг.}$$

44. Материальный баланс индукционной печи LFD-12 — плавка № 47

Материал	Общая масса, кг	Состав, кг									
		C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe	H ₂ O	Летучие, кислород	Процент
Материалы, поступившие в печь — приход											
Жидкий чугун в печи (зумпф)	2800	105,00	61,60	26,60	3,64	0,392	1,82	2600,92	—	—	—
Возврат чугуна	5100	181,05	114,24	62,22	9,44	0,102	3,37	4729,59	—	—	—
Чугун переделанный	3520	150,05	27,34	23,84	0,70	1,472	2,874	3299,62	14,1	—	—
Стальные отходы	1950	4,86	4,86	13,60	5,83	1,301	0,719	1911,05	7,8	—	—
Ферросилиций	153	0,077	65,45	0,47	0,50	0,002	—	86,49	—	—	—
Жидкий чугун	540	19,6	12,10	6,48	0,918	0,016	0,320	500,61	—	—	—
Итого металлозавадки	14063,0	460,74	285,59	133,21	21,03	3,285	9,103	13128,28	21,9	—	—
Графит в зернах	104,0	87,88	4,1	0,029	—	0,187	0,022	—	2,81	Летучие — 0,905; Кислород — 4,72	3,347
Песок от материалов и футеровки	13,2	—	6,18	—	—	—	—	—	—	7,05	—
Кислород из атмосферы	17,95	—	—	—	—	—	—	—	—	17,95	—
Итого приход	14198,18	548,62	295,87	133,24	21,03	3,472	9,125	13128,28	24,71	30,625	3,347
Материалы, полученные в печи — расход											
Жидкий чугун	14090,00	542,47	281,80	126,81	20,92	3,382	9,018	13107,93	—	—	—
Чугун в шлаке	7,14	0,28	0,143	0,06	0,11	0,002	0,006	6,64	—	—	—
Шлак	52,86	—	13,98	4,14	—	0,018	0,022	7,604	—	21,825	5,321
Газы и влага	39,45	5,87	—	—	—	0,070	—	—	24,71	8,800	—
Невязка баланса	+8,73	—	—	+2,23	—	—	—	+6,01	—	—	-1,974
Итого расход	14198,18	548,62	295,87	133,24	21,03	3,472	9,125	13128,28	24,71	30,625	3,347
Окислилось (угар)	—	5,87	3,65	6,34	—	0,07	0,101	13,71	—	—	—

Количество окисленных в процессе плавки элементов (кг):

Углерод	548,62 - (542,47+0,28) = 5,87
Кремний	285,59—(281,8+0,143) = 3,65
Марганец	133,21—(126,81+0,06) = 6,34
Сера	3,472—(3,382+0,002+0,018) = 0,07
Фосфор	9,125—(9,018+0,006) = 0,101
Железо	13128,28—(13107,93+6,64) = 13,71

45. Количество кислорода, пошедшего на окисление

Окисляющий- ся элемент, кг	Оксид	Количество кислорода на окисление, кг	Масса оксида газообразно- го, кг
5,87 C	CO	$\frac{5,87 \times 16}{12} = 7,825$	13,695
3,647 Si	SiO ₂	$\frac{3,646 \times 32}{28} = 4,17$	—
6,34 Mn	MnO	$\frac{6,34 \times 16}{55} = 1,84$	—
0,07 S	SO ₂	$\frac{0,07 \times 32}{32} = 0,07$	0,14
0,101 P	P ₂ O ₅	$\frac{0,101 \times 80}{62} = 0,13$	—
13,71 Fe	FeO	$\frac{13,71 \times 16}{56} = 3,91$	—
Итого . . . 17,95			13,835

Полученное количество кислорода введено в приходную часть баланса (см. табл. 44), из которого видно, что общая невязка составляет 8,73 кг, или 0,06% всего прихода или расхода. Невязка в содержании отдельных элементов невелика. Более значительна невязка в графе «Прочие», что связано с невязкой химического состава шлака.

Несколько более высокий угар элементов плавки № 44 по сравнению с плавкой № 47 связан с использованием в шихте чугушной стружки (770 кг), которая имеет большую поверхность по отношению к массе, что способствует протеканию реакций окисления.

Общий угар элементов невелик и для плавки № 44 составляет 0,465%, а для плавки № 47—0,21% (если бы угар железа плавки № 44 был бы такой же, как плавки № 47, то общий угар для плавки № 44 составил бы 0,26%).

Эти результаты хорошо согласуются с результатами, полученными д-ром техн. наук В. С. Кочо и др. Из этих данных видно, что использование в шихте стружки приводит к повышению угара.

Для определения количества теплоты, полученной в результате экзотермических реакций окисления при составлении тепловых балансов, угар элементов был взят средний и пересчитан на 1 т металлозавалки. Ниже приведен полученный угар (кг/т) следующих элементов:

Углерод	0,590
Кремний	0,746
Марганец	0,455
Сера	0,016
Фосфор	0,012
Железо	1,575

Количество теплоты (ккал/т), выделившейся в результате окисления этих элементов [16]:

$$Q_C = 0,590 \cdot 2497 = 1470$$

$$Q_{Si} = \frac{0,746 \cdot 207850}{28} = 5540$$

$$Q_{Mn} = \frac{0,455 \cdot 96630}{55} = 770$$

$$Q_S = \frac{0,016 \cdot 70910}{32} = 35$$

$$Q_P = \frac{0,012 \cdot 37000}{31} = 14$$

$$Q_{Fe} = \frac{1,575 \cdot 64430}{56} = 1810$$

$$\text{И т о г о} \quad 9659 \text{ ккал/т или } 11,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$$

Таким образом, на основании составления материальных балансов плавов № 44 и 47 количество теплоты, введенной путем экзотермических реакций, можно принять в среднем на 1 т металлозавалки равной 9639 ккал или 11,2 кВт·ч.

Материальный баланс ИЧТ-6 (плавка № 20). В печи плавляли легированный чугун типа нирезист. Количество составляющих, введенных в печь, и их состав приведены в табл. 46.

Загрузку шихты и ведение плавки выполняли в следующем порядке. В пустой тигель заливали жидкий чугун, который взвешивали на прессдукторе. Все материалы перед загрузкой в печь взвешивали на цеховых весах. Слитки (переплав) загружали в печь по мере расплавления металла. Перед окончанием плавки скачивали шлак, который взвешивали и определяли его химический состав. После скачивания шлака в жидкий расплав добавля-

46. Количество составляющих, введенных в печь ИЧТ-6

Материал	Марка	Масса, кг	Содержание, %		
			C	Si	Mn
Жидкий чугун — зумпф	СЧ	3070	3,55	2,02	0,75
Слитки (переплав)	Пирезист	3080	2,33	2,82	0,60
Ферросилиций	ФС45	150	0,04	46,24	0,31
Феррофосфор	ФФ	130	0,12	—	0,61
Ферромарганец	ФМп1, ОА	31	5,98	1,81	70,40
Феррохром	ФХ800	126	7,15	0,28	—
Никель гранулированный	ПЗ	815	0,01	—	—
Медь	М1	315	—	—	—
Графит в зернах	—	—	87,99	—	Зола 9,16

Материал	Содержание, %				
	Cr	Ni	Cu	P	S
Жидкий чугун — зумпф	0,16	—	—	0,77	0,039
Слитки (переплав)	2,00	15,5	6,00	0,48	0,051
Ферросилиций	0,40	—	—	—	0,020
Феррофосфор	—	—	—	15,45	0,075
Ферромарганец	—	—	—	0,394	0,010
Феррохром	65,80	—	—	—	0,014
Никель гранулированный	—	98,31	0,56	—	0,019
Медь	—	—	99,99	—	—
Графит в зернах	—	—	Летучие 1,51	—	0,19

ли медь и при достижении температуры расплава 1550°С брали пробу на химический анализ, затем выливали готовый металл из печи в ковш (табл. 47).

Количество влаги, введенное с шихтой, не учитывали ни в приходе, ни в расходе. Количество окиси кремния, вносимой в печь с шихтой и от эрозии стенок тигля, определяли по той же методике. Материальный баланс плавки приведен в табл. 48.

Количество окисленных элементов (кг):

Углерод 214,78—(207,9+0,65)=6,23
Кремний 219,14—(207,13+0,65)=11,36

Марганец	64,59—(56,98+0,18) = 7,43
Хром	150,01—(147,80+0,46) = 1,75
Никель	1293,55—(1285,9+4,03) = 1,57
Сера	3,039—(2,002+0,006) = 1,031
Фосфор	37,38—(36,96+0,116) = 0,3
Железо	5251,63—(5215,21+16,36) = 20,06

47. Химический состав выплавленного чугуна

Готовый чугун		Шлак из печи	
Состав	Количество, %	Состав	Количество, %
C	2,7	SiO ₂	69,92
Si	2,69	CaO	1,82
Mn	0,74	MnO	9,05
Cr	1,92	MgO	0,43
Ni	16,7	Al ₂ O ₃	1,98
Cu	7,0	Fe ₂ O ₃	10,1
P	0,48	FeO	2,63
S	0,026	Cr ₂ O ₃	2,07
		P ₂ O ₅	0,037
		NiO	1,91
		S	0,04
		Прочие	0,003

Угар меди не учитывали, считая невязку баланса неточностью анализов. Количество кислорода, пошедшее на окисление этих элементов, приведено в табл. 49.

Общая невязка баланса получалась всего 2,30 кг ~ 0,03%. Более значительная невязка, как и в предыдущих случаях, получалась в графе «Прочие» (табл. 48). Обращает внимание относительно большое количество окисленной серы. Возможно это связано с неточностью анализов по сере, так как содержание серы очень невелико и небольшая неточность анализа сильно сказывается на балансе серы.

Определяем количество теплоты (ккал), выделившейся от сгорания элементов за плавку:

$$Q_C = 6,23 \cdot 2497 = 15560$$

$$Q_{Si} = \frac{11,36 \cdot 207850}{28} = 84179$$

$$Q_{Mn} = \frac{7,43 \cdot 96630}{55} = 13010$$

$$Q_{Cr} = \frac{1,75 \cdot 288900}{52} = 9721$$

$$Q_{Ni} = \frac{1,57 \cdot 58300}{58,7} = 1556$$

$$Q_S = \frac{1,03 \cdot 70910}{32} = 2280$$

$$Q_P = \frac{0,3 \cdot 58390}{32} = 357$$

$$Q_{Fe} = \frac{20,06 \cdot 64430}{56} = 23\,069$$

Итого . . . 149 822 ккал или 174 кВт·ч

или на 1 т металлозавалки $\frac{174}{7,753} = 22,4$ кВт·ч.

Таким образом, при плавке легированного чугуна типа нирезист в результате угара элементов выделяется значительно больше теплоты, чем при плавке немодифицированного чугуна. Повышенный угар элементов при выплавке легированного чугуна типа нирезист объясняется более высокой температурой его при выпуске составляющей 1550°C по сравнению с чугуном, выплавляемым на печах LFD-12, где температура металла при выпуске равна 1400—1450°C.

Энергетические (тепловые) балансы плавки. Для печей LFD-12 составлено несколько балансов в разные периоды кампании тигля (плавки № 55, 64, 96 и 149, тигель № 4), для печи ИЧТ-6 — один баланс плавки № 20 (с начала кампании) для той же плавки, для которой составлен и материальный баланс. Для печей LFD-25 составлено четыре упрощенных тепловых баланса.

В приходной части баланса определяли расход электроэнергии на плавку по цеховым приборам и количество энергии (теплоты), полученное в результате экзотермических реакций, которое определяли на основании составленных выше материальных балансов.

В расходной части учитывали энергию (теплоту), пошедшую на нагрев, расплавление и перегрев металла, теплоту шлака, а также потери теплоты в индукторе через стенки тигля, излучением с поверхности металла в тигле, в трансформаторе, в конденсаторах и проводах.

При составлении энергетических (тепловых) балансов печи LFD-12 теплоту шлака учитывала вместе с теплотой металла. При составлении энергетического (теплого) баланса печи ИЧТ-6 теплота шлака была выделена в отдельную графу.

Энергию (теплоту), пошедшую на нагрев, расплавление и перегрев, определяли с учетом теплоты чугуна, оставшегося в тигле, — зумпфа, и теплоты чугуна, заливаемого в тигель в конце плавки.

48. Материальный баланс индукционной печи ИЧТ-6 — плавка № 20

Материал	Масса, кг	Состав, кг										
		C	Si	Mn	C _r	Ni	Cu	S	P	Fe	Летучие, кислород	Прочие
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Материалы, поступающие в печь — приход												
Жидкий чугун	3070	108,99	62,01	23,03	4,91	5,1	2,1	1,20	2,36	2860,18	—	—
Слитки — переплав	3080	71,76	86,86	18,48	61,60	477,4	184,8	1,573	14,78	2162,73	—	—
Ферросилиций	150	0,06	69,36	0,47	0,60	—	—	0,030	—	79,48	—	—
Феррофосфор	130	0,16	—	0,79	—	—	—	0,090	20,08	108,88	—	—
Ферромарганец	31	1,85	0,56	21,82	—	—	—	0,003	0,12	6,64	—	—
Феррохром	126	9,01	0,35	—	82,90	—	—	0,017	—	33,73	—	—
Никель	815	0,08	—	—	—	811,05	3,81	0,156	—	—	—	—
Медь	351	—	—	—	—	—	350,96	—	—	—	—	0,04
Итого металлозавадки	7753	191,91	219,14	64,59	150,01	1293,55	541,67	3,039	37,34	5251,63	—	0,04
Графит в зернах	26	22,87	0,79	—	—	—	—	0,049	0,004	—	Летучие 0,39 Кислород 0,9	0,997
Песок со слитков и футеровки	69,42	—	32,44	—	—	—	—	—	—	—	36,98	—

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Кислород из атмосферы	31,86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31,86	—
Итого приход	7880,28	214,78	252,37	64,59	150,01	1293,55	541,67	3,088	37,38	5251,63	70,13	1,037
Материалы, полученные из печи,— расход												
Жидкий чугун . .	7700	207,90	207,13	56,91	147,80	1285,90	539,00	2,002	36,96	5215,21	—	—
Чугун в шлаке .	24,15	0,65	0,65	0,18	0,46	4,03	1,69	0,006	0,116	16,36	—	—
Шлак	136,85	—	44,59	9,59	1,96	2,052	—	0,05	0,022	12,79	60,34	3,33
Газы и влага . .	16,98	6,23	—	—	—	—	—	—1,03	—	—	9,72	—
Невязка баланса (0,03%) . . .	2,3	—	—	—2,16	—0,21	—0,48	+0,98	—	—0,018	+7,27	—	—2,293
Итого расход	7880,28	214,78	252,37	64,59	150,01	1293,55	541,67	3,088	37,38	5251,63	70,13	1,037
Окислилось (угар)	—	6,23	11,36	7,43	1,75	1,57	—	1,03	0,30	20,06	—	—

49. Количество кислорода, пошедшее на окисление

Окисляющий элемент, кг	Оксид	Количество кислорода на окисление, кг	Масса газообразного оксида, кг
6,23C	CO	$\frac{6,23 \times 16}{12} = 8,30$	14,53
11,36Si	SiO ₂	$\frac{11,36 \times 32}{28} = 12,98$	—
7,46Mn	MnO	$\frac{7,47 \times 16}{55} = 2,17$	—
1,75Cr	Cr ₂ O ₃	$\frac{1,75 \times 48}{102} = 0,82$	—
1,57Ni	NiO	$\frac{1,57 \times 16}{58,7} = 0,430$	—
1,031S	SO ₂	$\frac{1,031 \times 32}{32} = 1,031$	2,060
0,3P	P ₂ O ₅	$\frac{0,3 \times 80}{62} = 0,39$	—
20,06Fe	FeO	$\frac{20,06 \times 16}{56} = 5,74$	—
Итого . . . 31,86			16,59

Теплосодержание чугуна типа нирезист, выплаваемого в печи ИЧТ-6, определяли по его химическому составу, а теплоемкость шлака — экспериментально ($C_{\text{шл}} = 0,301$ ккал/(кг·°С)).

Потери энергии (теплоты) в индукторе и через стенки тигля определяли путем измерения количества воды, охлаждающей индуктор, и разности температур входящей и выходящей воды.

Индуктор печи LFD-12 разделен на девять секций, поэтому приходилось замерять количество воды в девяти сливных патрубках и температуру отходящей воды в девяти точках, а также температуру входящей воды.

Для того чтобы определить потери энергии (теплоты) в индукторе и потери через стенки тигля, измеряли температуру воды при отключенном индукторе и подсчитанное при этом количество теплоты считали потерей через стенки тигля, а количество энергии (теплоты), теряемой в индукторе, подсчитывали как разность (табл. 50).

Для печи ИЧТ-6 потери в индукторе и через стенки тигля определяли по такой же методике, только индуктор этой печи разделен на пять секций, а не на девять (табл. 51).

50. Потери энергии (теплоты) в индукторе и через стенки тигля
(печь LFD-12, тигель 4, плавка № 64 с начала кампании, продолжительность плавки 2 ч)

Показатель	Секция индуктора								Общий расход энергии на плавку, кВт·ч
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расход воды, м ³ /ч	1,50	1,80	1,80	1,29	1,80	1,50	1,12	1,50	1,80
Среднее повышение температу- ры воды при включенном индукторе, °С	44,52	43,88	32,17	46,00	32,02	43,29	16,75	7,88	5,6
Энергия (теплота), уносимая водой за плавку, кВт·ч . . .	154,98	183,75	134,70	137,54	134,07	151,04	43,79	27,11	23,45
Среднее повышение температу- ры воды при отключенном индукторе, °С	6,0	6,25	5,50	8,25	5,75	6,25	5,50	5,5	4,5
Энергия (теплота), теряемая через стенки тигля за плав- ку, кВт·ч	20,93	26,17	23,05	24,67	24,08	21,81	14,4	19,19	18,84
Потери энергии (теплоты) в индукторе, кВт·ч	—	—	—	—	—	—	—	—	—
									193,14
									797,30

51. Расчет потерь энергии (теплоты) в индукторе и через стенки тигля (печь ИЧТ-6, плавка № 20 от начала кампании, продолжительность плавки 204 мин)

Показатель	Секции индуктора					Общий расход энергии за плавку, кВт·ч
	1	2	3	4	5	
Расход воды, м³/ч	2,25	1,5	2,0	1,8	2,0	—
Среднее повышение температуры воды при включенном индукторе, °С	25,80	30,20	23,00	30,00	16,60	—
Энергия (теплота), уносимая водой за плавку, кВт·ч	229,56	179,36	182,08	213,27	131,4	935,7
Среднее повышение температуры воды при отключенном индукторе, °С	5,0	7,0	5,5	5,0	4,0	—
Энергия (теплота), теряемая через стенки тигля за плавку кВт·ч	44,48	41,52	43,49	35,58	31,63	196,7
Потери энергии (теплоты) в индукторе, кВт·ч	—	—	—	—	—	739,0

Потери энергии (теплоты) излучением при открытом тигле (кВт·ч за плавку) подсчитывали по формуле

$$Q_{\text{изл}} = C_{\text{луч}} \left[\left(\frac{T_{\text{м}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{отв}} \tau_{\text{откр}} k_{\text{д}},$$

где $C_{\text{луч}}$ — коэффициент лучеиспускания; $T_{\text{м}}$, $T_{\text{окр}}$ — температуры соответственно металла в тигле и окружающей среды, К; $F_{\text{отв}}$ — площадь отверстия тигля, м²; $\tau_{\text{откр}}$ — относительное время открытия отверстия; $k_{\text{д}}$ — коэффициент диафрагмирования за счет того, что уровень металла в тигле ниже верхней кромки.

Потери энергии в трансформаторе, конденсаторах и проводах для печи LFD-12 были приняты 10% от израсходованной из сети электроэнергии, на основе данных фирмы и неоднократных наблюдений.

Для печи ИЧТ-6 была сделана попытка теоретически определить отдельно потери в трансформаторе, проводах и конденсаторах, при этом получено:

Потери, кВт·ч за плавку:

в трансформаторе, принимая к.п.д.

трансформатора 95%, 172,50

в конденсаторах 67,8

в проводах 147,7

Итого 388,00 кВт·ч, что составляет ~11,0% от энергии, взятой из сети.

Энергетические (тепловые) балансы плавки приведены в табл. 52, 53.

52. Энергетические (тепловые) балансы плавков печи LFD-12 (тигель № 4)

Показатель работы печи и статья баланса	№ плавки от начала кампании тигля			
	55	64	96	149
Количество загруженного в печь металла, т.	8,4	5,8	10,5	9,4
Зумпф, т.	4,5	6,0	3,4	4,0
Время плавки, ч.	2,92	2,0	4,0	4,68
Температура выпущенного металла, °C	1380	1430	1400	1400
Производительность печи, т/ч.	2,88	2,9	2,6	2,4
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т.	535,0	576,0	550,5	573,0
Приход энергии (теплоты), кВт·ч (°C):				
электроэнергия из сети	4483,8(96,88)	3341,7(96,2)	5781,0(97,32)	5400,0(97,29)
экзотермические реакции	144,5(3,12)	131,0(3,8)	155,5(2,68)	150,0(2,71)
Итого приход	4628,3(100,0)	3472,7(100,0)	5936,5(100,0)	5550,0(100,0)
Расход энергии (теплоты), кВт·ч (°C):				
на расплавление и нагрев металла	2047,4(63,66)	2140,2(61,48)	3727,5(62,90)	3337,0(60,14)
потери в индукторе	902,0(19,50)	787,3(22,70)	1262,0(21,12)	1210,7(21,80)
потери через стенки тигля	244,1(5,28)	193,1(5,56)	357,2(6,03)	333,4(5,98)
потери излучением зеркала металла	92,0(1,98)	105,4(3,13)	46,6(0,79)	133,4(2,41)
потери в трансформаторе, конденсаторах и проводах	448,4(9,70)	334,2(9,65)	578,4(9,75)	540,0(9,75)
невязка баланса	-5,6(-0,12)	-87,5(-2,52)	-34,9(-0,59)	-4,4(0,08)
Итого расход	4628,3(100,0)	3472,7(100,0)	5936,5(100,0)	5550,0(100,0)

53. Энергетический (тепловой) баланс печи ИЧТ-6

Показатель работы печи и статья баланса	Плавка № 20
Твердая шихта, кг	4683
Жидкий чугун, кг	3070
Время плавки, ч	3,4
Температура выпущенного металла, °С	1550
Производительность, т/ч	1,38
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч	738
Приход энергии (теплоты), кВт·ч (%):	
электроэнергия из сети	3449,0 (95,2)
экзотермические реакции	174,0 (4,8)
Итого приход	3623,0 (100,0)
Расход энергии (теплоты), кВт·ч (%):	
расплавление и перегрев металла	1978,1 (54,63)
теплота шлака	59,7 (1,65)
потери в индукторе (см. табл. 51)	739,0 (20,40)
потери через стенку тигля (см. табл. 51)	196,7 (5,42)
потери излучением зеркала металла	72,8 (2,00)
потери в трансформаторе, конденсаторе и проводах	388,0 (10,70)
невязка баланса	188,7 (5,20)
Итого расход	3623,0 (100,0)

При составлении упрощенных балансов на печах LFD-25 измеряли только расход энергии и количество теплоты, пошедшей на нагрев, расплавление и перегрев чугуна. Количество энергии, вносимое путем экзотермических реакций, было принято как и на печи LFD-12, 11,2 кВт·ч/т металлозавалки. Потери в трансформаторе, проводах и конденсаторах были приняты равными 10% израсходованной электроэнергии, а разность между общим расходом энергии и расходом на нагрев, расплавление и перегрев металла плюс электрические потери составляли все прочие потери: в индукторе, через стенки печи, лучеиспусканием с поверхности ванны и т. д. (табл. 54).

54. Энергетические (тепловые) балансы плавков печи LFD-25

Показатель работы печи и статья баланса	№ плавки от начала кампании и № тигля				
	14-III	36-III	72-III	105-III	249-III
Количество загруженного в печь металла, т	18,1	16,2	23,2	17,0	16,5
Зумпф, т	8,6	8,5	2,0	10,0	9,0
Время плавки, ч	2,58	3,17	4,33	2,41	2,166
Температура выпущенного металла, °С	1450	1450	1450	1450	1440
Производительность печи, т/ч	7,03	5,08	5,36	7,05	7,156
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	552,0	561,0	545,0	535,0	503,2
Приход энергии (теплоты), кВт·ч (‰):					
электроэнергии из сети	10 000(97,0)	9100(97,1)	12 600(97,5)	9100(96,8)	7800(96,0)
экзотермические реакции	246(3,0)	274(2,9)	282(2,5)	304(3,2)	275(4,0)
Итого приход	10 296(100,0)	9374(100,0)	12 882(100,0)	9404(100,0)	8075(100,0)
Расход энергии (теплоты), кВт·ч (‰):					
расплавление и перегрев чугуна	6310(61,2)	6000(63,8)	8080(62,4)	6290(67,0)	5627(69,68)
электрические потери	1000(9,7)	910(9,7)	1260(9,8)	910(9,7)	780(9,66)
прочие потери (в индукторе, через стенки, излучением и т. д.)	2986(29,1)	2464(26,5)	3542(27,8)	2204(23,3)	1668(20,66)
Итого расход	10 296(100,0)	9374(100,0)	12 882(100,0)	9404(100,0)	8075(100,0)

Примечание. При проведении плавки № 14, 72 и 249 часть шихты подогревали.

Ниже рассмотрены результаты анализа энергетических (тепловых) балансов печей LFD-12, LFD-25 и ИЧТ-6.

По печи LFD-12 невязка баланса составляет незначительную величину 0,08—0,59% и только на плавке № 64—2,52%. Причем, эта невязка имеет отрицательный знак, т. е. расход теплоты получился несколько больше прихода. По всей вероятности потери в трансформаторе, конденсаторах и проводах или от излучения зеркала ванны были в действительности несколько меньше, чем приняты в балансе. По печи ИЧТ-6 невязка значительно больше — 5,2% и имеет положительный знак, т. е. расход теплоты получился несколько меньше прихода. Это можно также объяснить неточностью учета потерь в трансформаторе, конденсаторах и проводах или наличием неучтенных энергетических (тепловых) потерь. Печь LFD-12 работает с к. п. д. порядка 60,1—63,7%, а LFD-25 с к. п. д. порядка 61,0—69,0%, тогда как на печи ИЧТ-6 полезно использованная теплота (с учетом теплоты шлака) составляла ~56,3%.

Если сравнить относительные величины отдельных статей расхода энергии (теплоты) для печей LFD-12 и ИЧТ-6, то они довольно близки для обеих печей. Потери энергии (теплоты) в индукторе для печи LFD-12 колеблются в пределах 19,5—22,7%, для печи ИЧТ-6 — они составляют 20,4%. Потери через стенки тигля печи LFD-12 колеблются в пределах 5,28—6,02%, увеличиваясь несколько по ходу кампании тигля. Для печи ИЧТ-6 потери через стенки тигля были 5,42% (в начале кампании). Потери энергии (теплоты) излучением зеркала металла печи LFD-12 в пределах 0,79—2,41%, печи ИЧТ-6—2,0%. Потери энергии в трансформаторе, конденсаторах и проводах печи LFD-12 составляют 9,65—9,75%; печи ИЧТ-6—10,7%. Кроме того, для печи ИЧТ-6 имеются неучтенные потери (что было указано выше), равные ~5,2%. Что касается прихода теплоты, то для печи ИЧТ-6 доля энергии (теплоты) экзотермических реакций несколько больше, чем для печи LFD-12, 4,8% против 2,7—3,8%, что объясняется более высокой температурой выпускаемого из печи чугуна и более сложным его составом.

Удельные расходы электроэнергии печи LFD-12 колеблются (для исследованных плавов) в пределах 535—576 кВт·ч/т, тогда как печи ИЧТ-6 (для исследованной плавки) составляют 738 кВт·ч/т. Более высокий удельный расход электроэнергии на печи ИЧТ-6 связан не только с более низким к.п.д., но также с большим расходом энергии на 1 т расплавляемого металла за счет более высокой температуры выпускаемого чугуна, равной 1550°C, тогда как температура чугуна, выпускаемого из печи LFD-12, колебалась в пределах 1380—1450°C.

Для построения энергетической характеристики печей LFD-12, зависимости удельного расхода электроэнергии от производительности печи, были подобраны материалы их работы за

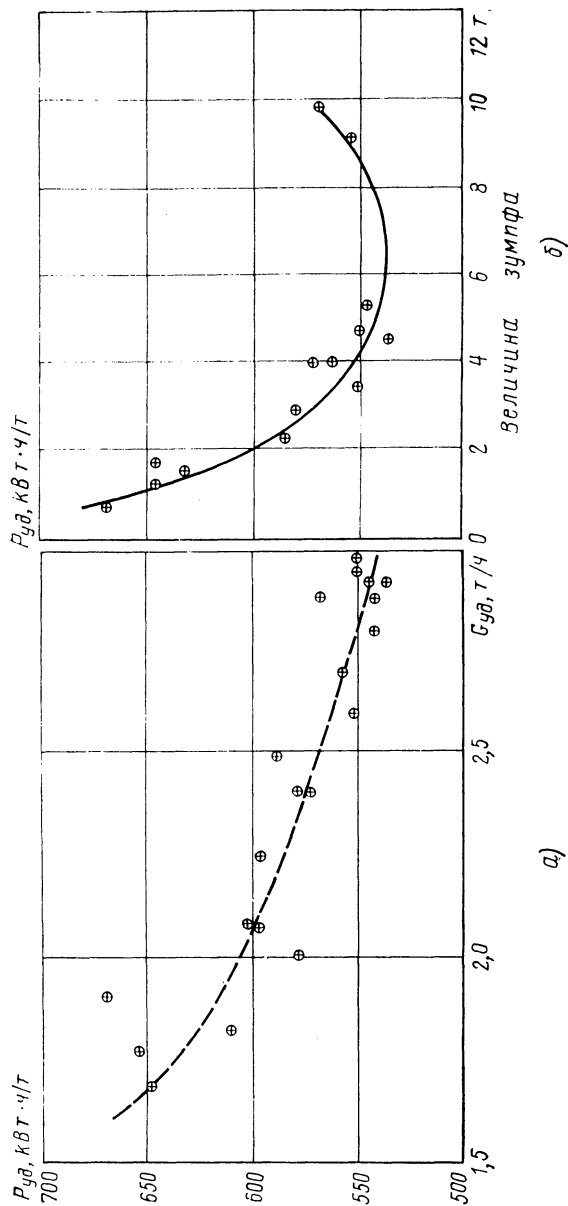


Рис. 61. Удельный расход электроэнергии $P_{уд}$ в зависимости от часовой производительности $G_{уд}$ (а) — от величины зумпфа (б) для печи LFD-12

октябрь — декабрь 1973 г. и апрель — май 1974 г. По этим данным построен график, приведенный на рис. 61, а.

Кроме того, был проведен анализ влияния величины зумпфа на показатели работы печи — время плавки и удельный расход электроэнергии (рис. 61, б). Установлено, что существует оптимальная величина зумпфа, которая колеблется в пределах 4,5—7,0 т. При отклонении от этих величин удельный расход электроэнергии увеличивается. По печи ИЧТ-6 таких зависимостей получено не было.

3. УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Факторы, влияющие на технико-экономические показатели.

Технико-экономические показатели индукционных плавильных печей (производительность G , т/ч, и удельный расход электроэнергии $P_{уд}$, кВт·ч/т) зависят прежде всего от емкости печи и установленной мощности. С увеличением емкости печи удельные потери энергии (теплоты), отнесенные к 1 т расплавленного металла, уменьшаются, в результате чего увеличивается производительность G и понижается удельный расход электроэнергии $P_{уд}$.

Для печей определенной емкости G и $P_{уд}$ сильно зависят от установленной мощности. Так, фирма «Group Boverg Company» печь номинальной емкостью 8,45 т поставляет с установленной мощностью трансформатора 560, 1000 и 1800 кВт·А. Расчетные значения G и $P_{уд}$ при этом равны соответственно $G=0,78$; 1,57 и 2,83 т/ч, а $P_{уд}=570$; 520 и 490 кВт·ч/т.

Экспериментальные значения G и $P_{уд}$ в зависимости от загрузки для печей ИЧТ-6; LFD-12 и LFD-25 приведены на рис. 62. Для печи ИЧТ-6 эти значения получены при выплавке высоколегированного чугуна типа нирезист, они, как показано выше, должны сопоставляться с технико-экономическими показателями этих печей при выплавке стали, а не чугуна.

На рис. 62 приведены также опытные данные для тигельной индукционной печи промышленной частоты емкостью 8 т фирмы «Ford Motors Brasil S. A.» (Сан Паоло) при плавке чугуна [31] и область расчетных значений G и $P_{уд}$ для печей фирмы

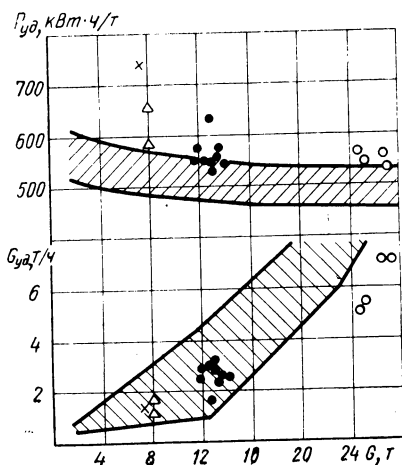


Рис. 62. Влияние емкости печи на удельную производительность $G_{уд}$ и удельный расход электроэнергии $P_{уд}$: x — печь ИЧТ-6; $\triangle$ — печь емкостью 8,0 т; $\bullet$ — печь LFD-12; $\circ$ — печь LFD-25; заштрихованные области — расчетные значения G и $P_{уд}$ при разной установленной мощности

«Broun Boverу Company» в зависимости от емкости и установленной мощности.

Для действующих печей, имеющих определенные емкость и установленную мощность, улучшение технико-экономических показателей связано с такими режимными факторами, как работа с оптимальной величиной зумпфа (см. рис. 61, б) и с правильной организацией загрузки печей шихтой. Кроме того, понижение $P_{уд}$ можно достичь применением оптимальной теплоизоляции стенок тигля и, наконец, значительного повышения G и понижения $P_{уд}$ — путем предварительного подогрева шихты газообразным топливом.

Правильная организация загрузки шихты. Экспериментально показано, что низкочастотная индукционная тигельная печь работает на полную мощность при условии, что ванна заполнена металлом не менее, чем на 2/3 ее объема [31]. При меньших объемах металла количество энергии, поглощаемое металлом в печи, составляет:

Количество расплавленного металла, %	12,5	25	37,5	50	70
Расход энергии, %	30	45	62	78	98

Поскольку высота металла в печи в реальных условиях изменяется в широких пределах (200—1600 мм для печи LFD-12), то в зависимости от организации загрузки шихтой количество энергии, поглощаемое металлом в печи, может быть различным. Количество энергии, выделяющейся в металле печи (активная мощность, выделившаяся в садке) в зависимости от конструктивного выполнения индуктора, внутреннего диаметра тигля и высоты металла в печи может быть рассчитано. Ниже приведены исходные данные для расчета активной мощности, выделившейся в садке, для печи LFD-12:

Размеры индуктора, см:	
внутренний диаметр D	147
полная высота H_n	180
рабочая высота H	121
Внутренний диаметр тигля (исходный) d , см	119
Толщина стенки тигля (исходная) δ , см	14
Высота садки (металла) в печи h , см	20—160
Частота печи f , Гц	50
Полное число витков индуктора ω_n	54
Рабочее число витков индуктора ω	36
Высота витка индуктора b , см	2,4
Зазор между витками индуктора Δ , см	0,9

Методика и последовательность расчета количества энергии, выделяющейся в металле.

1. Приведенная высота индуктора (см)

$$H' = H - \frac{1}{2} \Delta \omega.$$

2. Сопротивление индуктора (Ом)

$$R_1 = 8,1 \cdot 10^{-7} D \sqrt{\frac{f}{H}} \omega^2.$$

3. Самоиндукция одного витка для индуктора (Г)

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} D k_1.$$

Значения коэффициента k_1 [31] в зависимости от отношения $\frac{D}{H}$ следующие:

$\frac{D}{H}$ или $\frac{d'}{h}$	. . .	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	2,6
k_1	. . .	11,5	13,5	15,3	17,0	18,2	21,0	24,0

4. Коэффициент самоиндукции индуктора (Г)

$$L_1 = 10^{-9} \lambda_1 \omega^2.$$

5. Приведенный диаметр тигля (см)

$$d' = d - 5030 \sqrt{\frac{\rho_2}{f_2}},$$

где ρ_2 — удельное электросопротивление расплавленного металла, принято $\rho_2 = 126 \cdot 10^{-6}$ Ом·см/см²; μ — магнитная проницаемость металла в печи; плавка ведется с обязательным наличием зумфа (по технологии минимальное количество зумфа 4 т), поэтому принято $\mu = 1$.

6. Коэффициент самоиндукции одного витка (Г) для садки, равной коэффициенту самоиндукции садки

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} d' k_1 = L_2.$$

Значения коэффициента k_1 в зависимости от отношения $\frac{d'}{h}$ приведены выше.

7. Коэффициент взаимной индукции (Г) системы индуктор — садка

$$M = 10^{-9} \frac{\pi^2 (d')^2}{2h} \omega \sqrt{k_2}.$$

Коэффициент k_2 является функцией отношений $\frac{D}{H}$ и $\frac{H}{h}$, его значения приведены в табл. 55.

8. Коэффициент трансформации

$$k = \frac{M}{L_2}.$$

9. Коэффициент самоиндукции печи (Г)

$$L_{\Pi} = L_1 - k^2 L_2.$$

55. Коэффициент k_2

$\frac{D}{H}$	Значения k_2 при отношении H/h									
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,75	2,0	2,5
0,7	2,02	1,77	1,54	1,36	1,20	1,07	1,95	0,80	0,63	0,41
0,8	1,84	1,60	1,39	1,23	1,08	0,97	0,86	0,72	0,57	0,37
0,9	1,67	1,46	1,25	1,12	0,98	0,88	0,78	0,65	0,52	0,34
1,0	1,53	1,33	1,15	1,00	0,89	0,79	0,71	0,59	0,47	0,31
1,1	1,40	1,22	1,04	0,92	0,81	0,72	0,64	0,54	0,43	0,28
1,2	1,28	1,10	0,95	0,84	0,74	0,65	0,58	0,49	0,38	0,25

10. Индуктивное сопротивление печи (Ом)

$$X_{\Pi} = 2\pi f L_{\Pi}.$$

11. Ток в индукторе (А)

$$I_1 = \frac{U}{X_{\Pi}}.$$

12. Потери в индукторе (кВт)

$$P_1 = 10^{-3} I_1^2 R_1.$$

13. Активная мощность (кВт), выделяющаяся в садке,

$$P_2 = 6,1 \cdot 10^{-10} k_2 k_3 I_1^2 \omega^2 \sqrt{\rho_2 f^{1/4}}.$$

Ниже приведены значения коэффициента k_3 в зависимости от отношения $\frac{d'}{h}$:

$\frac{d'}{h}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,6	2,0
k_3	1,91	2,48	3,12	3,79	4,52	5,41	7,38	8,40	9,6	18,5

Для конкретных условий потери в индукторе P_1 и активную мощность P_2 (кВт), выделившуюся в садке, можно представить

$$P_1 = 10^{-3} A U^2,$$

$$P_2 = 10^{-3} B U^2,$$

где U — напряжение, В; A и B — коэффициенты, определяемые высотой садки (металла) в печи h и толщиной стенки тигля δ (рис. 63, а, б).

Максимум мощности P_1 и P_2 наблюдается при $h=110 \div 120$ см, что соответствует количеству металла в печи, равному 9—10 т, т. е. расчетные данные удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов [31]. С уменьшением δ или зазора между

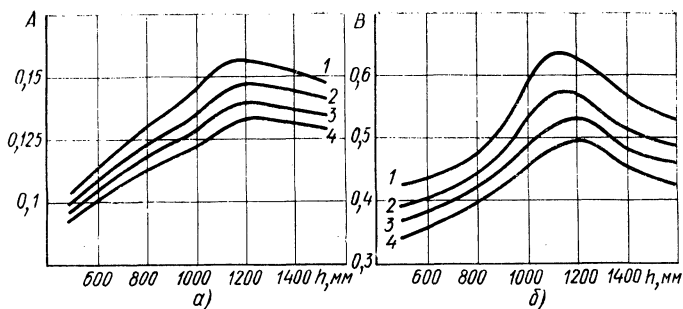


Рис. 63. Коэффициенты для определения потерь энергии A (а) и количества энергии, выделившейся в садке B (б) в зависимости от высоты садки h , толщины стенки тигля δ :
1 — $\delta=110$ мм; 2 — $\delta=120$ мм; 3 — $\delta=130$ мм; 4 — $\delta=140$ мм

индуктором и садкой мощности P_1 и P_2 увеличивается. Практически это подтверждается тем, что в конце кампании печи максимальная величина напряжения понижается из-за перегрева воды, охлаждающей индуктор. Так, если во время первых плавов максимальное рабочее напряжение не превышает 1570 В, то в конце кампании оно понижается до 1500—1530 В. Энергию E_1 , потерянную в индукторе, и энергию E_2 , выделившуюся в садке (кВт·ч), при дискретной загрузке печи шихтой можно определить по формулам

$$E_1 = 10^{-3} \sum_{i=1}^{i=n} A_i U_i^2 \tau_i, \quad (1)$$

$$E_2 = 10^{-3} \sum_{i=1}^{i=n} B_i U_i^2 \tau_i, \quad (2)$$

где τ_i — продолжительность работы печи при высоте садки h_i ; U_i — напряжение во время рассматриваемого периода τ_i . Если принять износ тигля за время работы печи равномерным и равным 0,1 мм за плавку, то для определения внутреннего диаметра тигля d и высоты садки металла в печи (см) можно использовать выражения

$$d = 147,0 - 2 \left(14,0 - \frac{n}{100} \right);$$

$$h = \frac{4G}{\pi d^2 \gamma},$$

здесь n — количество плавов с начала кампании печи; G — масса металла в печи (на печах LFD-12 и LFD-25 она указывается и регистрируется); γ — удельный вес металла в печи, для расплавленного чугуна можно принять $\gamma = 7000$ кгс/м³.

Энергетическая диаграмма $U_i=f(\tau_i)$ и диаграмма загрузки $G=f(\tau)$ одной из плавков (плавка № 279, тигель 6) приведены на рис. 64. Исходные данные для определения коэффициентов A_i и B_i и их значения в зависимости от высоты садки h сведены в табл. 56. Толщина стенки тигля δ принята равной 110 мм.

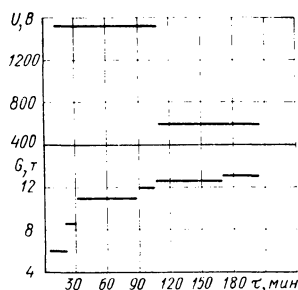


Рис. 64. Энергетическая диаграмма $U=f(\tau)$ и диаграмма загрузки $G=f(\tau)$ для плавки № 279

56. Коэффициенты A_i и B_i

Показатель	Масса металла в печи G , т					
	6,0	8,5	11,0	12,0	12,5	13,0
h , см	70,0	100,0	128,0	140,0	145,0	151,0
τ_i , мин	10	10	60	15	65	35
A_i , кВт·В ²	0,12	0,15	0,156	0,151	0,150	0,149
B_i , кВт·В ²	0,444	0,585	0,608	0,567	0,552	0,544

Потери энергии в индукторе получаем по формуле (1)

$$E_1 = \left[\left(0,12 \frac{10}{60} + 0,15 \frac{10}{60} + 0,156 \frac{60}{60} + 0,151 \frac{15}{60} + 0,15 \frac{5}{60} \right) \times \right. \\ \left. \times 1520^2 + \left(0,15 \frac{60}{60} + 0,149 \frac{35}{60} \right) \cdot 580^2 \right] \cdot 10^{-3} = 665 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Аналогично по формуле (2) получаем энергию, выделившуюся в садке:

$$E_2 = \left[\left(0,444 \frac{10}{60} + 0,585 \frac{10}{60} + 0,608 \frac{60}{60} + 0,567 \frac{15}{60} + 0,552 \frac{5}{60} \right) \times \right. \\ \left. \times 1520^2 + \left(0,552 \frac{60}{60} + 0,544 \frac{35}{60} \right) 580^2 \right] 10^{-3} = 2534 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Экспериментальные значения E_1 и E_2 оказались равными соответственно 650 и 2620 кВт·ч. Для других плавков расчетные и экспериментальные значения E_1 и E_2 , а также погрешность расчета $\Delta E = \frac{E_{\text{расч}} - E_{\text{эксп}}}{E_{\text{эксп}}}$ приведены в табл. 57.

Как видно из данных, приведенных в табл. 57, соответствие расчетных и экспериментальных данных удовлетворительно. Экспериментальные значения E_1 и E_2 определяли из теплового баланса соответствующих плавков:

$$E_1 = E_{\text{в}} - E_{\text{т}};$$

$$E_2 = E_{\text{п}} + E_{\text{т}} + E_{\text{л}} - E_{\text{экз}},$$

где $E_{\text{н}}$, $E_{\text{т}}$, $E_{\text{д}}$ — потери энергии соответственно с водой, охлаждающей индуктор, теплопроводностью через стенки печи и лучеиспусканием; $E_{\text{ц}}$ — полезно затраченная энергия; $E_{\text{экз}}$ — энергия экзотермических реакций.

57. Значения E_1 и E_2

№ плавки	Потери энергии в индукторе E_1 , кВт·ч			Энергия, выделявшаяся в садке, E_2 , кВт·ч		
	Расчетные	Экспериментальные	ΔE_1	Расчетные	Экспериментальные	ΔE_2
13	801	777	0,031	2804	2858	—0,02
31	739	697	0,06	2442	2632	—0,078
278	665	650	0,023	2534	2620	—0,033
279	725	690	0,051	2815	2768	0,021
295	1100	1065	0,043	4045	3963	0,017

Из зависимостей, приведенных на рис. 63, б, следует, что организация загрузки печи шихтой может существенно изменить величину E_2 . Соответственно изменится удельный расход электроэнергии и производительность печи. На рис. 65 приведены три режима загрузки печи LFD-12, для которых расчетом определены продолжительность плавления и перегрева чугуна, общий

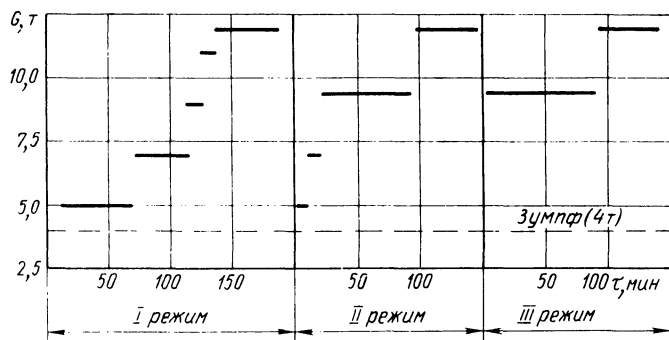


Рис. 65. Режимы загрузки печи LFD-12

расход электроэнергии и технико-экономические показатели $P_{\text{уд}}$ и G . Толщина стенки печи принята равной 140 мм, напряжение 1570 В. Результаты расчетов приведены в табл. 58.

Из данных, приведенных в табл. 58, видно, что улучшение технико-экономических показателей работы печи может быть достигнуто рациональным режимом загрузки печи шихтой. При

этом производительность печи может быть увеличена на 20—30%, а удельный расход электроэнергии уменьшен на 20—25 кВт·ч/т.

Расчетным способом можно проанализировать и влияние скорости загрузки печи v (т/ч) на производительность печи и удельный расход электроэнергии. Если принять толщину стенки печи $\delta=140$ мм, напряжение $u=1570$ В, зумпф 4 т и количество металла в печи 12 т, то для $v=3$ т/ч продолжительность плавки оказалась равной 3,38 ч; для $v=5$ т/ч — 3,41 ч и для $v=10$ т/ч — 3,43 ч. Практически не изменились и удельные расходы электроэнергии. Таким образом, скорость загрузки шихты в печь оказывает небольшое влияние на производительность и удельный расход энергии.

Оптимальная теплоизоляция стенок печи. Потери энергии (теплоты) теплопроводностью через стенки тигля достаточно велики и для печи LFD-12 в конце кампании они на 20—25% больше, чем в начале; это связано, очевидно, с износом стенок тигля (рис. 66). Если принять время работы печи 7000 ч, то

58. Расчетные значения $P_{уд}$ и G при разных режимах загрузки печи

Режим загрузки	Продолжительность плавки, ч	Удельный расход электроэнергии $P_{уд}$, кВт·ч	Производительность G , т/ч
I	3,13	565	2,52
II	2,43	540	3,25
III	2,35	536	3,36

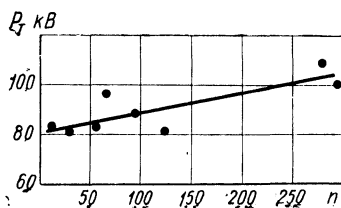


Рис. 66. Зависимость потерь энергии теплопроводностью через стенки тигля печи LFD-12 от числа плавов с начала кампании

общие потери за год через стенки тигля составляет $(5,6—7,0) \cdot 10^5$ кВт·ч, поэтому возникает вопрос об оптимальной теплоизоляции стенок тигля. Теплоизоляция осуществляется слоем асбеста различной толщины. При увеличении толщины теплоизоляции уменьшаются потери теплоты через стенки тигля, но повышается температура на наружной поверхности тигля под слоем теплоизоляции, что вызывает изменение величины структурных зон и может привести к преждевременному выходу тигля из строя.

Стенки тигля выполняют из кварцита и по толщине в направлении от металла к индуктору могут быть разделены на несколько зон: рабочую, переходную светло-коричневую, переходную темно-коричневую, плотную и малоизмененную (табл. 59).

Как известно, для огнеупорных материалов фактором, определяющим теплопроводность при прочих одинаковых условиях

59. Характеристика зон по сечению футеровки тигля
(данные получены после 258 плавов)

Участок по высоте тигля	Зона	Расстояние от металла, мм	Пористость, %	Кажущаяся плотность, г/см ³	Удельный вес, г/см ³
Верхняя часть под слив- ным носком	Рабочая	0—16	6,1	—	3,127
	Переходная светло-ко- ричневая	16—34	2,8	2,22	2,367
	Переходная темно-корич- невая	34—48	5,2	2,12	2,367
	Плотная	48—84	14,1	2,09	2,437
	Малоизмененная	84—122	18,7	2,09	2,624
Средняя часть под слив- ным носком	Рабочая	0—8	—	—	—
	Переходная светло-ко- ричневая	8—24	2,1	2,18	—
	Переходная темно-корич- невая	24—36	4,6	—	—
	Плотная	36—73	15,8	2,08	—
	Малоизмененная	73—119	16,1	—	—
Откос под сливным нос- ком	Рабочая	0—3	—	—	2,924
	Переходная светло-ко- ричневая	3—11	6,6	2,05	2,376
	Переходная темно-корич- невая	11—23	6,6	2,34	2,4
	Плотная	23—63	14,9	2,11	2,509
	Малоизмененная	63—98	18,8	2,10	2,633
Подина	Рабочая	0—17	32,6	3,02	3,332
	Переходная светло-ко- ричневая	17—33	—	—	2,436
	Переходная темно-корич- невая	33—57	—	—	2,504
	Плотная	57—79	17,8	2,12	2,511
	Малоизмененная	79	17,8	2,12	2,574

(химический состав, температура и т. д.), является пористость. Из табл. 59 видно, что зоны футеровки по пористости можно объединить в три группы. Первая группа включает рабочую, переходную светло-коричневую и переходную темно-коричневую зоны с пористостью 2,1—6,6% (исключая подину). Вторая груп-

на — плотная зона с пористостью 14,1—15,8% и третья — малоизмененная зона. По степени спекания футеровка условно подразделяется на области остеклования с $t > 1300^\circ\text{C}$, спекания с $t = 1000—1300^\circ\text{C}$ и неизмененную с $t < 1000^\circ\text{C}$.

Начиная с температуры 1000°C , коэффициенты теплопроводности кремнезема с пористостью 0 и 5—6% совпадают, поэтому можно принять их числовое значение за коэффициент теплопроводности зон первой группы. Для средней температуры этих зон $t_{\text{ср}} = 0,5$ ($1300 + 1450$) принимаем $\lambda = 6,5$ ккал/(м·ч·°C) [33]. Для зоны спекания (плотная зона) принимаем $\lambda = 1,2$ ккал/(м·ч·°C). Для малоизмененной зоны коэффициент теплопроводности был определен экспериментально (методом регулярного режима I рода) для образцов с кажущейся плотностью $2,1$ г/см³ и оказался $\lambda = 0,72$ ккал/(м·ч·°C). Термическое сопротивление футеровки с учетом зон с различной теплопроводностью

$$R_{\Phi} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3},$$

здесь $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ — толщины зон соответственно неизмененной, плотной и трех остальных вместе; λ_1, λ_2 и λ_3 — соответствующие зонам коэффициенты теплопроводности.

Для $\delta_1 = 0,038$ м, $\delta_2 = 0,036$ м, $\delta_3 = 0,048$ м (верхняя часть тигля под сливным носком) и $\lambda_1 = 0,72$ ккал/(м·ч·°C), $\lambda_2 = 1,2$ ккал/(м·ч·°C) и $\lambda_3 = 6,5$ ккал/(м·ч·°C) получаем $R_{\Phi} = 0,0902$ м²·ч·°C/ккал, что соответствует эффективному коэффициенту теплопроводности $\lambda_{\text{эф}} = 1,35$ ккал/(м·ч·°C) (толщина стенки тигля для этого случая $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 0,122$ м). Тепловой поток через стенку от металла к воде, охлаждающей индуктор, при этом $q_{\text{т}} = 11\,500$ ккал/(м²·ч). Зная величину теплового потока и границы зон, можно определить температурное поле в стенке тигля печи:

$$t_1 = 1450 - q_{\text{т}} \frac{\delta_3}{\lambda_3},$$

$$t_2 = 1450 - q_{\text{т}} \cdot \left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right),$$

$$t_3 = 1450 - q_{\text{т}} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right),$$

$$t_4 = 30 + q_{\text{т}} \left(\frac{\delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} \right),$$

где t_1, t_2, t_3, t_4 — соответственно температуры на границе между зонами остеклования и спекания, на границе между зоной спекания и неизмененной зоной, на внешней поверхности футеровки печи, на поверхности индуктора; $\delta_{\text{м}}$ — толщина стенки медного индуктора.

Распределение температур в стенке тигля толщиной 0,122 м при слое теплоизоляции 6 мм приведено на рис. 67. По экспериментальным данным, температура внешней поверхности стенки тигля при установке термонары на расстоянии ~380 мм от верхнего торца индуктора оказалась равной 380—420°C. Расчетная температура на поверхности тигля в верхней части печи под сливным носком $t_3=412^\circ\text{C}$.

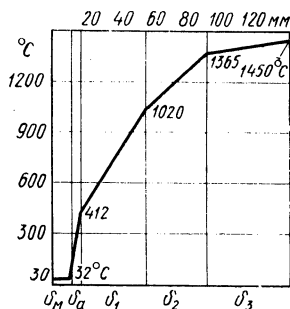


Рис. 67. Распределение температур в стенке тигля индукционной печи

Малоизмененная зона, или зона спекшегося кварца, служит амортизатором при ударных нагрузках во время загрузки печи шихтой, поэтому ее толщина должно быть не меньше определенного предела. Как указывалось выше, применение дополнительной асбестовой теплоизоляции тигля печи существенно уменьшает потери энергии (теплоты) теплопроводностью, но при этом изменяется и распределение зон по толщине стенки тигля. Заменяв зоны остеклования и спекания одной зоной с $t>1000^\circ\text{C}$ и приведенным коэффициентом теплопроводности $\lambda_{пр}=2,25$ ккал/(м·ч·°C), получим

$$\frac{1000 - 30}{\frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_1}{0,72}} = \frac{1450 - 1000}{2,25},$$

где δ_1 — толщина малоизмененной зоны; δ_a — толщина асбестовой изоляции; 0,12 — толщина стенки тигля после проведения ~200 плавов.

Термическими сопротивлениями стенки индуктора и от стенки к охлаждающей воде из-за незначительности пренебрегаем. Аналогично определяют и толщины зон остеклования и спекания. Расчетные значения толщин зон и температур на границах зон и на поверхности футеровки в зависимости от толщины асбестовой изоляции приведены в табл. 60.

60. Толщины зон в зависимости от асбестовой изоляции

Толщина асбеста δ_a , мм	q_T ккал/(м ² ·ч)	Толщина зоны, мм			Температура, °C		
		Малоизмененной δ_1	Спекания δ_2	Остеклованной δ_3	t_1	t_2	t_3
3	13 000	42	32	46	1358	1012	247
6	12 450	38	35	47	1360	997	445
8	11 250	30	40	50	1363	988	530
12	10 450	23	45	52	1366	974	670

Таким образом, если учитывать зоны с различными коэффициентами теплопроводности, то увеличение асбестовой изоляции с 6 до 12 мм уменьшает потери теплопроводностью на 16%. Но в то же время толщина неизменной зоны уменьшается с 38 до 23 мм, поэтому рекомендовать увеличение толщины теплоизоляционного слоя более 8 мм нельзя, толщина 6—8 мм является оптимальной.

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПОДОГРЕВ ШИХТЫ И ВЛИЯНИЕ ЕГО НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ (ТЕПЛОВОЙ) БАЛАНС ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

Предварительный подогрев металлической части шихты индукционных печей для плавки чугуна обеспечивает уменьшение расхода электроэнергии на плавку, в результате чего повышается производительность печей и понижается удельный расход электроэнергии. Нагрев шихты влияет также на технологические показатели работы печей, улучшает качество полученного металла благодаря высушиванию и обезжириванию шихты, что уменьшает газонасыщенность металла. Наконец, при подогреве шихты за счет ускорения плавки повышается стойкость футеровки тиглей.

Согласно исследованиям Института проблем литья АН УССР коэффициент интенсификации индукционных печей при работе на подогретой шихте можно определить по формуле

$$K = \frac{1}{1 - \frac{G'_{\text{ших}}}{G_{\text{ших}}} \left(\frac{i_{\text{ших}}}{i_{\text{мет}}} \right)},$$

где $G'_{\text{ших}}$ — масса подогреваемой шихты, кг; $G_{\text{ших}}$ — общая масса металлозавалки, кг; $i_{\text{ших}}$ — энтальпия (теплосодержание) подогретой шихты, ккал/кг; $i_{\text{мет}}$ — энтальпия (теплосодержание) жидкого металла, ккал/кг (с учетом теплоты плавления).

Увеличение производительности (кг/ч или т/ч) печи путем подогрева шихты

$$\Delta G = G(K - 1).$$

где G — производительность печи, кг/ч или т/ч.

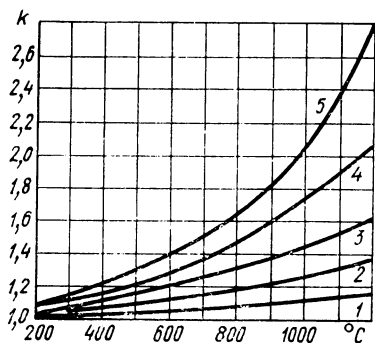
В производственных условиях обычно не представляется возможным нагревать всю шихту, хотя к этому нужно стремиться.

На рис. 68 показано изменение коэффициента интенсивности плавки k в зависимости от температуры подогрева шихты и от того, какая часть шихты подогревается при температуре выпуска чугуна 1450°C. Из графика видно, что коэффициент интенсивности k увеличивается при повышении температуры подогрева

шихты и при увеличении $\frac{G'_{\text{мах}}}{G_{\text{мах}}}$, т. е. доли подогретой шихты от всей металлозавалки.

Рис. 68. Изменение коэффициента интенсивности плавки k в зависимости от температуры подогрева шихты ($t_m = 1450^\circ\text{C}$):

1 — при $\frac{G'_{\text{ших}}}{G_{\text{ших}}} = 0,2$; 2 — при $\frac{G'_{\text{ших}}}{G_{\text{ших}}} = 0,4$; 3 — при $\frac{G'_{\text{ших}}}{G_{\text{ших}}} = 0,6$; 4 — при $\frac{G'_{\text{ших}}}{G_{\text{ших}}} = 0,8$; 5 — при $\frac{G'_{\text{ших}}}{G_{\text{ших}}} = 1,0$



Шихту подогревают обычно в газовых печах. Эффективность подогрева можно определить по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{Q_{\Gamma}}{860} \frac{\eta_{\Gamma}}{\eta_{\text{эл}}} \frac{C_{\text{эл.эн}}}{C_{\Gamma}},$$

где Q_{Γ} — теплота сгорания газа; η_{Γ} и $\eta_{\text{эл}}$ — к. п. д. газовой и электрической печей; $C_{\text{эл.эн}}$ и C_{Γ} — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии и η м³ газа.

В условиях Автогаза при $Q_{\Gamma} = 8200$ ккал/м³, $\eta_{\Gamma} = 20 \div 30\%$, $\eta_{\text{эл}} = 50 \div 65\%$, $C_{\text{эл.эн}} = 0,92$ к/кВт·ч, $C_{\Gamma} = 20$ р/1000 м³ — 2 к/м³, тогда

$$\mathcal{E} = \frac{8200}{860} \frac{\eta_{\Gamma}}{\eta_{\text{эл}}} \frac{0,92}{2,0} = 4,39 \frac{\eta_{\Gamma}}{\eta_{\text{эл}}} = 1,46 \div 2,63.$$

В результате подогрева шихты количество теплоты, идущей на нагрев и плавление чугуна, снизится, тогда как относительная величина потерь теплоты в индукторе, в трансформаторе, конденсаторах и проводах останется примерно той же. Следовательно, при введении подогрева шихты в некоторых случаях можно ожидать не повышения, а понижения к. п. д. печи, тогда как удельный расход энергии на 1 т выплавленного чугуна должен обязательно понизиться, если конечно не будет никаких других факторов, влияющих на работу печи.

Это положение подтверждается сравнением балансов плавки № 36 и 72 печи LFD-25 (см. табл. 54). При небольшом подогреве части шихты (19 ккал/т металлозавалки) при одинаковой производительности (5,08—5,36 т/ч) удельный расход электроэнергии плавки № 72 (с подогревом) составил 545 кВт·ч/т, тогда как плавки № 36 (без подогрева) — 561 кВт·ч/т. К. п. д. же печи плавки № 72 составил 62,4%, тогда как плавки № 36 — 63,8%. Что же касается плавки № 14 и 105, то сравнивать их нельзя, так как во время плавки № 14 еще имел место неуставившийся режим с расходом теплоты на нагрев и перекристаллизацию стенок тигля.

Улучшение качества чугуна, достигнутое благодаря отсутствию влаги и органических примесей в шихте, характеризуется данными, приведенными в табл. 61.

61. Свойства чугуна при плавке без подогрева и с подогревом шихты

Характеристика плавки чугуна	Содержание органических примесей и влаги, %	Температура выпуска чугуна, °С	Жидкотекучесть, мм	Механические свойства, кгс/мм ²	
				σ_B	$\sigma_{из}$
Без подогрева шихты	1,27	1450	274	16,3	68,6
С подогревом шихты	—	1450	310	19,5	87,2

Улучшение литейных и механических свойств чугуна, выплавленного с подогревом шихты, связано с уменьшением газонасыщенности металла.

Для подогрева шихты используют барабанные печи с загрузкой с одной стороны и выгрузкой — с другой. Их преимущество — непрерывность процесса подогрева шихты, но это преимущество не всегда может быть использовано, так как индукционные печи работают периодически — плавками.

Установка для подогрева шихты, используемая на Автогазе (фирмы «Elpit», Норвегия), представлена на рис. 69. Она состоит из тележки, на которую устанавливается бадья с шихтой. Эта тележка подается по рельсам к топке, расположенной вертикально. Топка с горелкой и вентиляторами (подающим воздух в горелку и отсасывающим охлаждающие газы) опускается на бадью, горелка зажигается, и происходит подогрев шихты. Отходящие газы попадают сначала в пространство между двойными стенками бадьи, а затем удаляются в окружающее пространство. Управление горелкой автоматизировано. Шихта подогревается до сравнительно невысоких температур (300—450°С), т. е. главным образом для удаления влаги, масел и СОЖ.

На рис. 70 и 71 показана аналогичная отечественная установка, представляющая собой топку, в которой сжигается газообразное топливо. На топку ставится бадья с шихтой. Бадья имеет дно с отверстиями, через которые газы из топки попадают в нее и обогревают шихту. Над бадьей устанавливается зонт, соединенный с вентиляционной системой, отводящей газы в окружающее пространство над крышей помещения, в котором расположена установка. Для того чтобы не было попадания газов в помещение, бадья снабжена сверху и внизу песочными затворами. Подъем, опускание и отвод зонта в сторону механизиро-

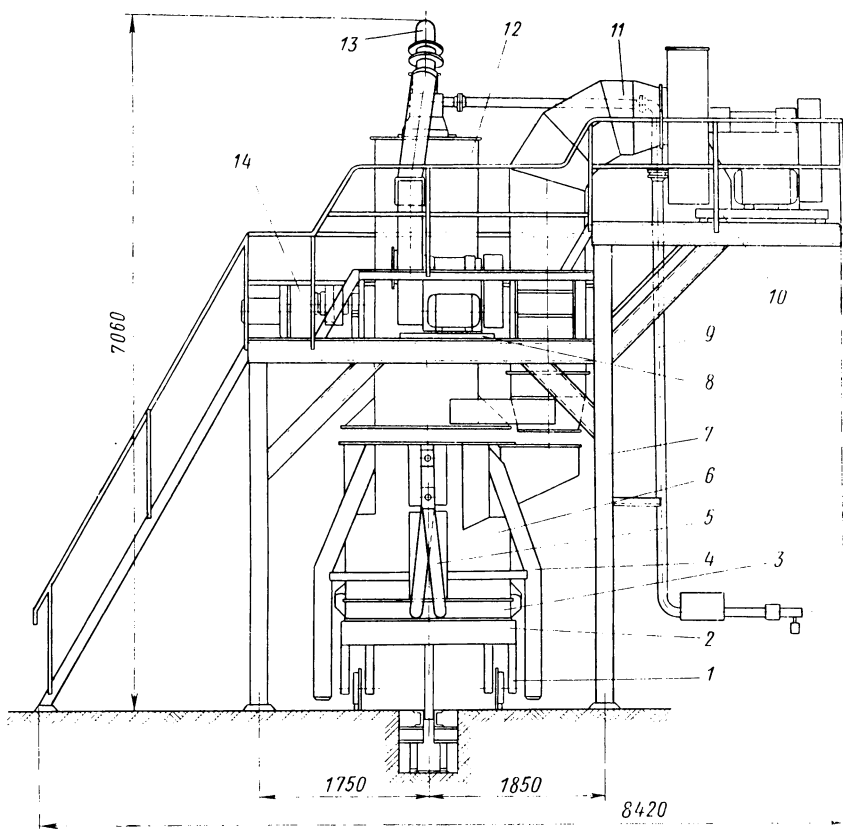


Рис. 69. Установка для подогрева шихты с верхней топкой:

1— колеса тележки; 2— тележка; 3— днище бадьи; 4— направляющие; 5— механизм открытия днища; 6— бадья с двойными стенками; 7— колонна; 8— вентилятор для подачи воздуха в горелку; 9— газопровод; 10— вентилятор для отвода продуктов горения; 11— газопровод отходящих газов; 12— топка; 13— воздухопровод к горелке; 14— двигатель для подъема и опускания топки

ван. Подогревать шихту в такой установке можно до температуры порядка 700—800°C. В случае подогрева замасленной стружки горение топлива приходится вести при значительном недостатке воздуха ($\alpha=0,5\div0,6$), иначе горение масла и других органических примесей может привести к сильному повышению температуры в отдельных местах, а также к сильному окислению подогреваемой стружки. Это относится и к мелкой кусковой шихте.

Использование энергии в канальных печах. В условиях Автогаза канальные печи используют в качестве накопителя (миксера). При работе этих печей энергия (теплота) расходуется в основном на компенсацию потерь в окружающее пространство, поскольку температура жидкого чугуна поддерживается в них

на постоянном уровне. Если температура сливаемого в печь чугуна несколько ниже требуемой, то в канальной печи происходит небольшой подогрев жидкого чугуна, но обычно расход энергии на подогрев значительно меньше, чем на компенсацию потерь в окружающее пространство, поэтому составление теплового баланса таких печей, работающих по режиму накопителя, теряет свой смысл.

Как было указано в гл. III, химический состав чугуна в канальной печи не изменяется, если в нее не вводить каких-либо добавок, поэтому составление материального баланса печи также обычно не проводится.

Для характеристики использования энергии (теплоты) в канальной печи с номинальной емкостью 45 т, работающей по режиму накопителя, на рис. 72 приведен график зависимости удельного расхода электроэнергии от суточной производительности печи, а на рис. 73 приведен график удельных расходов электро-

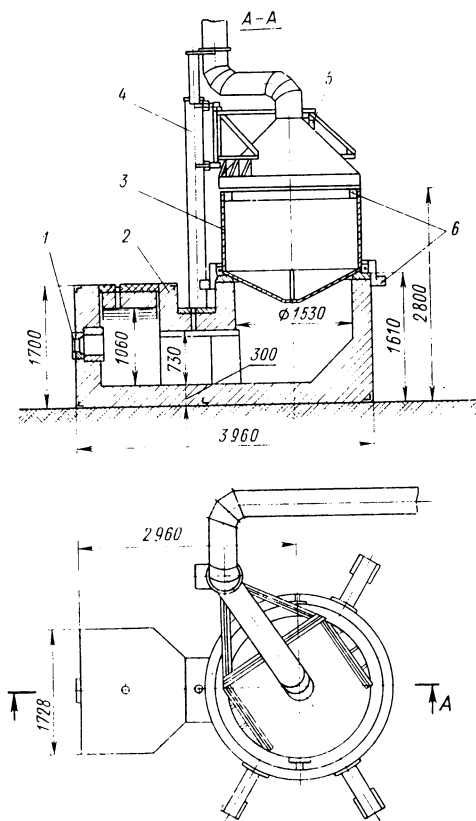


Рис. 70. Установка для подогрева шихты с нижней топкой:

1— горелка; 2— топка; 3— бадья; 4— механизм подъема и поворота зонта; 5— зонт; 6— песочные затворы

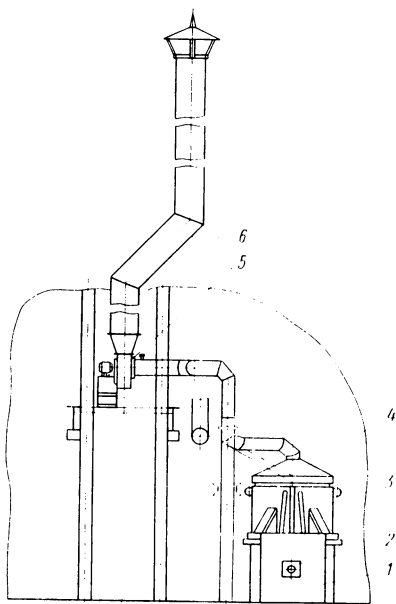


Рис. 71. Установка для подогрева шихты с нижней топкой (внешний вид):

1— топка; 2— горелка; 3— бадья; 4— зонт; 5— вентилятор для отвода продуктов горения; 6— труба для отвода отходящих газов

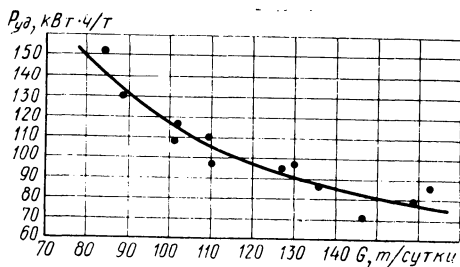


Рис. 72. Удельный расход электроэнергии в зависимости от суточной производительности для канальной печи емкостью 45 т

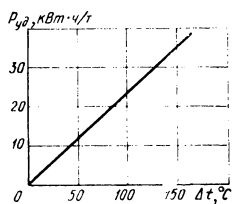


Рис. 73. Удельный расход электроэнергии на перегрев чугуна в канальной печи по данным фирмы ASEA

энергии на подогрев чугуна в зависимости от разности между температурой перегрева и температурой заливаемого в печь чугуна Δt .

Глава VI

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЧУГУНОПЛАВИЛЬНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ

1. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

В индукционных тигельных и канальных печах обычно применяют однофазное подключение к сети высокого напряжения через промежуточный регулировочный трансформатор. Ранее делали попытки использовать секционные обмотки в печах небольшой производительности с их подключением к трехфазной сети. При этом установлено, что такое включение неблагоприятно влияет на процесс плавления и затрудняет регулирование мощности при плавке. Коммутация в подводящей цепи высокого напряжения стандартна и не отличается от обычной [15].

При больших мощностях и питании печей токами промышленной частоты используют трансформаторы с широким диапазоном регулирования, длительное время находящиеся под нагрузкой. Число ступеней напряжения составляет 9—12 и более. Известны примеры установки двух групп трансформаторов для нескольких индукционных печей с возможностью подключения каждой печи к любому из трансформаторов. Первая группа состоит из регулируемых трансформаторов, а вторая регулирова-

ния не имеет и используется лишь для поддержания температуры жидкого металла.

Индукционные печи работают при сравнительно низких напряжениях и больших силах тока, поэтому для уменьшения потерь строят внутрицеховые подстанции в непосредственной близости от печей.

Присоединение значительной однофазной нагрузки приводит к созданию асимметричной нагрузки в фазах. По этой причине обязательна установка симметрирующего устройства, состоящего из дросселя и конденсатора, выравнивающего нагрузку между фазами.

В индукционных бессердечниковых печах реактивная мощность, выделяющаяся в зазорах и в тигле, превосходит активную мощность, выделяемую в расплавленном металле. Обычно считают, что в среднем $\cos \varphi = 0,1 \div 0,3$. Кроме того, из-за расплавления отдельных кусков шихты или сплавления их в единое целое, изменения температуры металла и других причин коэффициент мощности нестабилен по ходу плавки.

Канальные печи по сравнению с тигельными имеют более высокий коэффициент мощности, колебания которого при установленном режиме незначительны.

По указанным выше причинам обязательна установка конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности. Емкость батарей выбирают исходя из условия резонанса в цепи с частотой питающего тока. Обычно устанавливают две батареи конденсаторов: одну — с постоянной емкостью, другую — с переменной, которая используется при автоматическом регулировании коэффициента мощности.

В индукционных плавильных печах промышленной частоты используют следующие основные узлы автоматического регулирования: поддержания силы тока, обеспечивающей получение наибольшей активной мощности и, наивыгоднейшего коэффициента мощности. В первом случае регулирующее воздействие осуществляется путем переключения ступеней напряжения печного трансформатора, а во втором — включением или выключением групп емкостей. Кроме того, на печах устанавливают приспособления для контроля за состоянием стенок тигля.

В принципе возможно регулирование температуры расплавленного металла переключением ступеней напряжения трансформатора. Это возможно в том случае, если будут созданы температурные датчики, стабильно работающие в течение длительных промежутков времени.

Подробные данные по автоматизации индукционных плавильных печей приведены в книге А. Д. Свенчанского и Э. Л. Трейзона [25]. На рис. 74 для примера приведена блок-схема системы регулирования индукционной печи промышленной частоты (регулятор АРЭР-П) [25, 11]. В блоке автоматического регулирования тока и напряжения I сравниваются сигналы, полученные от

трансформаторов тока и напряжения $ТТ$ и $ТН$ с заданной величиной. При их рассогласовании командный импульс поступает в переключающее устройство ступеней напряжения печного трансформатора. Ширина зоны нечувствительности составляет при этом 12—20%.

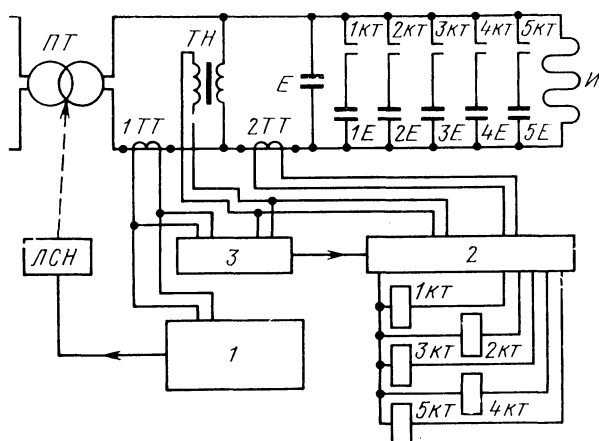


Рис. 74. Блок-схема регулирования плавильных индукционных печей промышленной частоты:

1— блок регулирования напряжения; 2— блок переключения; 3— блок, учитывающий изменение $\cos \varphi$

Блок компенсации мощности используют в качестве измерительного элемента — датчика фазы, связанного с трансформатором тока $ТТ$ и трансформатором напряжения $ТН$. Банки конденсаторной батареи переключают под нагрузкой контакторами $1КТ—5КТ$. Емкость группы батарей E остается при этом неизменной.

Группировка включаемых и выключаемых батарей меняется у разных установок в широких пределах. Например, у печей ИЧТ-6 переменная часть конденсаторной батареи состоит из шести групп, имеющих емкости 150, 300 и 600 квар, а также трех по 1200 квар. Применяя различные комбинации включения групп, можно получать 31 ступень емкости.

В индукционных печах имеет место следующее соотношение [24]:

$$\frac{i_{\text{ист}}}{i_{\text{ном}}} = \frac{r_{\text{ном}}}{r_{\text{экв}}} \cdot \frac{1}{\cos \varphi}, \quad (3)$$

здесь $i_{\text{ист}}$ — фактическая сила тока; $i_{\text{ном}}$ — номинальная сила тока; $r_{\text{ном}}$ — номинальное сопротивление контура; $r_{\text{экв}}$ — эквивалентное сопротивление контура, состоящего из индуктора печи и конденсаторов.

Из формулы (3) следует, что при изменении $\cos\varphi$ отношение $\frac{i_{\text{ист}}}{i_{\text{ном}}}$ также меняется. Блок 3 и предназначен для поддержания $\cos\varphi$ на уровне, обеспечивающем максимальную загрузку трансформатора по току. На том же принципе основаны автоматические регуляторы АРИР для индукционных плавильных печей промышленной частоты.

Приводим данные по электроснабжению канальных печей емкостью 30 и 40 т, применяемых в качестве миксеров в чугунолитейных цехах. На печах, как указывалось в гл. I, могут быть установлены индукторы мощностью 200, 300, 400, 500, 700 и 1100 кВт. На двухканальных печах используют индукторы 2×700 и 2×1600 кВт, причем каждый из них питается от своего собственного трансформатора. Индуктор имеет 10—11 ступеней переключения для изменения режима при перегреве и выдержке металла, и для спекания его футеровки. Так, на печи емкостью 30 т устанавливают два трансформатора по 840 кВт·А со следующими ступенями вторичного напряжения: 810—768—725—682—640—596—555—490—341—245 В.

Две конденсаторные батареи работают параллельно с индуктором, полная мощность 2080 квар, напряжение 1030 В, частота 50 Гц, $\cos\varphi = 0,95$.

2. ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Вопросы водоснабжения индукционных плавильных печей должны тесно увязываться с общей системой водоснабжения литейного цеха и всего завода в целом. Соблюдение нормальных параметров водяного охлаждения и качества охлаждающей воды существенно сказывается на сроках службы индукторов плавильного агрегата.

Расчет количества охлаждающей воды производится по обычной для расчета поверхностных теплообменников методике. Определяющей величиной в этом случае является скорость воды в змеевиках. Повышение скорости, с одной стороны, ведет к увеличению интенсивности теплоотдачи к охлаждающей воде, но с другой — резко повышает гидравлическое сопротивление системы. В первом приближении можно считать, что средняя скорость должна лежать на уровне $\sim 1,5$ м/с. Подробные данные по этому вопросу приведены в [4].

Потери теплоты с охлаждающей водой, включающие потери в индукторе и через футеровку печи, и как показано в гл. V, составляют 20—40% всей электрической энергии, потребляемой из сети. Расход воды (м³/ч) определяют по формуле

$$V_{\text{в}} = \frac{P}{100} \frac{W}{\tau} \frac{860}{\Delta t} \cdot 10^{-3},$$

здесь P — доля теплоты, уносимой охлаждающей водой, %; W — расход электрической энергии на плавку, кВт·ч; τ — продолжительность плавки, ч; Δt — перепад температур охлаждающей воды, °С.

Абсолютные расходы воды увеличиваются с повышением производительности индукционной печи. На рис. 75 и 76 даны часовые расходы воды V_B , отнесенные к номинальной емкости G и к номинальной мощности N_H печей. Эти данные получены в резуль-

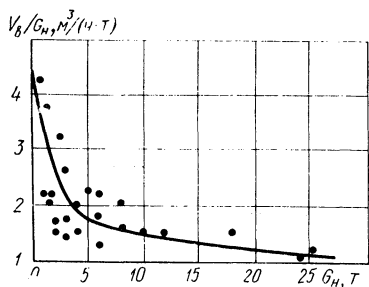


Рис. 75. Зависимость удельного расхода охлаждающей воды $\frac{V_B}{G_H}$ от емкости индукционных печей (G_H)

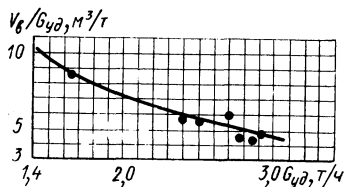


Рис. 76. Зависимость

$$\frac{V_B}{G} = f(G_{уд})$$

тате статической обработки опубликованных данных о расходе воды для ряда отечественных и зарубежных тигельных индукционных печей для плавки чугуна.

Из рис. 75 и 76 можно сделать следующие выводы: для печей малой производительности $\frac{V_B}{G_H} = 3 \div 4 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{т})$, для печей большой производительности $\frac{V_B}{G_H} \approx 1,6 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{т})$, хотя получающийся разброс точек значителен.

Таким образом, абсолютный расход воды для плавильных агрегатов емкостью 25 т колеблется в пределах $(1,2 \div 2,2) 25 = 30 \div 55 \text{ м}^3/\text{ч}$. Приведенные данные носят приближенный характер, но их можно использовать для предварительных оценок.

Отношение $\frac{V_B}{N_H}$ для печей небольшой производительности изменяется примерно от 0,01 до 0,02 м³/ч на 1 кВт и далее стабилизируется на уровне 0,007 м³/ч на 1 кВт установленной мощности.

Удельный расход воды на 1 т выплавленного металла (м³/т) определяется следующим образом:

$$\frac{V_B}{G} \left(\frac{V_B}{G} \right) \left(\frac{G_H}{G} \right) K, \quad (4)$$

здесь $\frac{V_{\text{в}}}{G} \approx 1,6 \div 2,0$; $\frac{G}{G_{\text{н}}}$ — отношение часовой производительности печи к номинальной емкости, $\frac{G}{G_{\text{н}}} = 0,2 \div 0,4$; K — коэффициент, учитывающий наличие холостых ходов, простоев, разогревов печи и пр.; G — производительность печи, т/ч.

Из формулы (4) следует, что удельный расход воды зависит от часовой производительности печи. Зависимость $\frac{V_{\text{в}}}{G} = f(G_{\text{уд}})$ (рис. 76) получена в результате проведения опытных плавов в печи емкостью 12 т. Если в формуле (4) принять

$\frac{V_{\text{в}}}{G_{\text{н}}} = 1,6 \text{ м}^3(\text{ч} \cdot \text{т})$, $\frac{G}{G_{\text{н}}} = 0,35$ и $K = 1,1$, то $\frac{V_{\text{в}}}{G} = 1,6 \frac{1}{0,35} \times 1,1 = 5,0 \text{ м}^3/\text{т}$, что примерно соответствует зависимости, приведенной на рис. 76.

Все изложенное относится к расходам воды на тигельные индукционные печи для плавки чугуна. Данные о расходе воды на каналные печи чугунолитейных цехов носят более отрывочный характер. В первом приближении можно принять

$$\frac{V_{\text{в}}}{G} = 0,4 \div 1,0 \text{ м}^3(\text{ч} \cdot \text{т});$$

$$\frac{V_{\text{в}}}{N_{\text{н}}} = 0,01 - 0,015 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{кВт}).$$

Температура воды $t_{\text{вх}}$, поступающей в систему охлаждения, должна быть выше точки росы. Обычно, учитывая необходимость определенного запаса, принимают $t_{\text{вх}} = 20 \div 30^\circ\text{C}$ *.

Верхний предел повышения температуры охлаждающей воды ограничивается возможностью накипеобразования на внутренних стенках змеевиков. В табл. 62 приведены растворимости важнейших накипеобразователей в пределах $20-100^\circ\text{C}$.

62. Растворимость основных накипеобразователей, мг/л

$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	CaSO_4	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
20	2040	50	1590	9,8
40	2110	39	1360	9,5
50	2080	32	1240	8,8
60	2015	27	1125	8,0
100	1695	14,8	658	4,5

* Это необходимо для того, чтобы избежать коррозии наружных поверхностей. Точкой росы называют температуру, соответствующую относительной влажности воздуха, равной 100%.

Из данных, приведенных в табл. 62, следует, что заметное снижение растворимости наступает при температуре воды выше 60°C. Обычно поддерживают температуру воды на выходе 40—50°C. Перепад температуры воды в плавильном агрегате в указанных условиях составляет 20—30°C. Использование теплоты отходящей воды из-за низкого температурного потенциала затруднительно. В качестве перспективы можно рекомендовать в дальнейшем использовать испарительное охлаждение у агрегатов большой производительности.

По начальному давлению охлаждающей воды существуют два варианта водоснабжения: разомкнутая система с получением воды от заводской сети ($p_{нач} = 2 \div 3$ кгс/см²) и замкнутая оборотная система с насосами, повышающими давление ($p_{нач} = 6$ кгс/см²). Повышение начального давления позволяет уменьшить количество секций охлаждения индукционной печи.

К качеству охлаждающей воды для печи LFD-12 емкостью 12 т предъявляют следующие требования: общая жесткость должна быть не более 2,8 мг-экв/л, содержание сульфидов и хлоридов не более 50 мг/л, плотный остаток не более 10 мг/л.

Фактический анализ охлаждающей воды на установке Автогаза: общая жесткость 1,1—1,6 мг-экв/л, общая щелочность 4,0 кг-экв/л.

Схема охлаждения тигельных индукционных печей ASEA, použíванная на Автогазе, представлена на рис. 77. Замкнутая схема препятствует накоплению в охлаждающей воде агрессив-

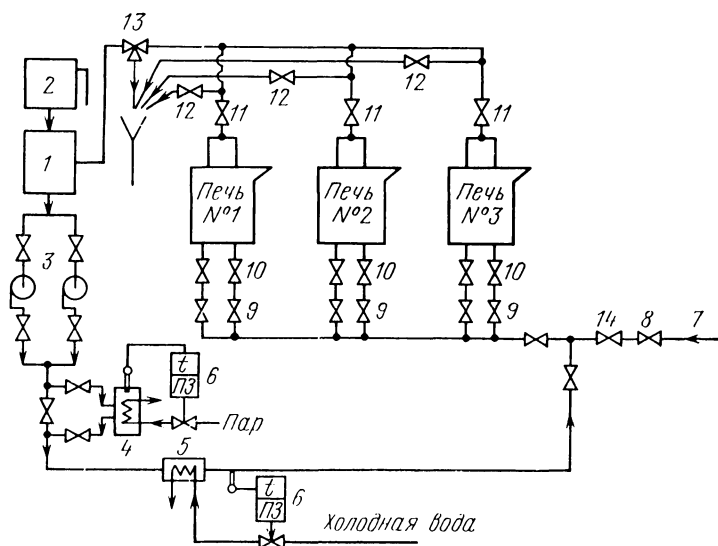


Рис. 77. Принципиальная схема водоснабжения индукционной плавильной печи емкостью 12 т

ных газов. Трубопроводы горячей воды выполнены из латуни, чтобы не возникла гальваническая пара между железом труб и цинком латуни штуцеров.

Охлаждающая вода из сборного бака 1, соединенного с расширительным резервуаром 2, поступает во всасывающую линию одного из двух центробежных насосов 3. Другой насос остается в резерве. Производительность каждого насоса $60 \text{ м}^3/\text{ч}$, развиваемый напор 6 кгс/см^2 . Вода подогревается в подогревателе 4, а для понижения температуры в случае необходимости служит охладитель 5. Оба теплообменника снабжены регуляторами температуры прямого действия 6 на базе манометрических термометров. Свежая вода подается в систему от цеховой сети, а в аварийных случаях через подвод 7, снабженный обратным клапаном 8.

На подводящих линиях к печам установлены две пары вентилей 9 и 10, первые из них являются запорными, вторые резервные, используемые в случае выхода из строя запорных. Выходящая вода может быть направлена или в сборный бак 1 или в канализацию с помощью вентилей 11 и 12. Излишек воды из системы в случае необходимости через трехходовой кран 13 спускается в канализацию. Управление вентилями 13 и 14 заблокировано таким образом, что спуск воды в канализацию синхронно сопровождается подачей свежей воды в систему.

Схема оборудована рядом дополнительных элементов, не показанных на рис. 77, к ним относятся расходомеры (ротаметры) на выходных линиях после печей, термометры с сигнальными контактами, воздуховыпускные приспособления (вантузы) и др.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Проблема измерения температуры жидкого чугуна и стали в условиях литейных цехов до сих пор окончательно не решена. Бесконтактные способы дают большие погрешности, связанные с неопределенностью величины коэффициента излучения, а контактные — не обеспечивают стабильности измерения. Однако, поскольку температура металла является определяющим параметром разливки, возникает необходимость в подробном рассмотрении существующих способов измерения и перспектив дальнейшего их улучшения.

Ниже рассмотрены приборы и применяемые способы измерения температуры жидкого чугуна и стали [6].

Пирометры излучения. Для измерения температуры в струе и на желобе используют оптические пирометры, а в ковше и в ванне — радиационные, фотоэлектрические и цветовые пирометры.

Оптические пирометры используют для измерения температуры расплавленного чугуна и стали в основном в струе. Они

относятся к пирометрам частичного излучения. Принцип действия заключается в измерении интенсивности монохроматического излучения, которое до температуры $\sim 3000^\circ\text{C}$ с достаточной степенью точности можно подсчитать при помощи уравнения Вина *:

$$E_\lambda = C_1 \varepsilon_\lambda \lambda^{-5} e^{-C_2/\lambda T},$$

где E_λ — интенсивность излучения при данной длине волны, ккал/(м·м²·ч); ε_λ — коэффициент степени черноты при частичном излучении; T — температура, К; e — основание натуральных логарифмов; C_1 и C_2 — постоянные, $C_1 = 3,17 \cdot 10^{-16}$ ккал/(м²·ч) и $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К [7].

Из уравнения (5) следует, что интенсивность излучения $E_\lambda = f(\varepsilon_\lambda, T, \lambda)$. Для исключения влияния длины волны в пирометрах частичного излучения устанавливают красные светофильтры позволяющие проводить измерения при $\lambda = 0,65 \text{ мкм} = \text{const}^{**}$.

Все пирометры частичного и полного излучения отградуированы таким образом, что показывают действительную температуру только при излучении абсолютно черного тела. У реальных тел приборы показывают заниженную температуру, которую называют радиационной или яркостной. У пирометров частичного излучения яркостную температуру T_λ определяют из выражения

$$\frac{1}{T_\lambda} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}. \quad (6)$$

Для нахождения истинной температуры T обычно используют специальные графики или таблицы, полученные в результате решения уравнения (6). При измерении температуры жидкого чугуна с достаточной степенью точности можно принимать $\varepsilon_\lambda = 0,5$ при измерении в струе и $\varepsilon_\lambda = 0,55$ при измерении на желобе. Следует отметить, что часто в производственных условиях поправки на коэффициент черноты не вводят. Это нужно иметь в виду при использовании информационных материалов.

Принцип действия оптических пирометров заключается в сравнении интенсивностей монохроматического излучения измеряемого тела и нити фотометрической лампы накаливания.

В промышленности применяют оптические пирометры типа ОППИР-09 и более современная их модификация ОППИР-017 (рис. 78). Приборы ОППИР-09 имеют пределы измерения $800 - 2000^\circ\text{C}$, другие разновидности ОППИР-017 позволяют измерять температуры до 6000°C .

* Уравнение Вина является частным случаем закона Планка.

** Значение $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$ близко к максимальной чувствительности человеческого глаза.

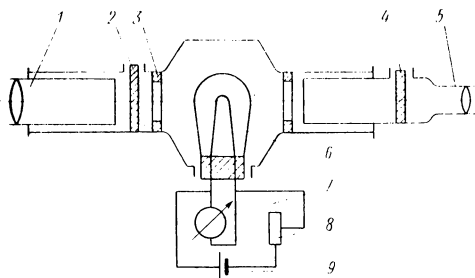


Рис. 78. Принципиальная схема оптического пирометра ОППИР-09

Оптические пирометры состоят из следующих основных узлов:

а) оптической системы, состоящей из объектива 1; ослабляющего светофильтра 2, который вводится при температуре измеряемого тела выше 1200°C ; направляющей диафрагмы 3; монохроматического красного светофильтра 4 и окуляра 5;

б) фотометрической лампы накаливания 6, включенной в схему последовательно с переменным сопротивлением 8 и источником тока 9;

в) магнитоэлектрического милливольтметра 7, включенного параллельно фотометрической лампе и служащего измерительным прибором у пирометров ОППИР-09.

Прибор имеет две шкалы: верхнюю — для измерения температур в пределах $800\text{—}1400^{\circ}\text{C}$ и нижнюю — для измерения температур $1200\text{—}2000^{\circ}\text{C}$. При отсчете по нижней шкале перед фотолампой включается ослабляющий светофильтр 2. Он дает возможность измерения более высоких температур без перегрева нити фотометрической лампы и предохраняет глаз наблюдателя. В пирометрах ОППИР-017 вместо милливольтметра 7 устанавливают дифференциальный амперметр, имеющий меньшую цену деления. Реостатом 8 изменяют силу тока, поступающего в лампу. Ток, проходя через лампу, накаливает металлическую нить. Каждому значению силы тока соответствует определенная температура и интенсивность излучения нити. В зависимости от накала нити меняется падение напряжения в фотометрической лампе, измеряемое милливольтметром 7. Таким образом, стрелка прибора показывает температуру нити.

Измерение температуры с помощью оптических пирометров производится следующим образом. Изменяя положение объекта по отношению к окуляру, совмещаем изображение нити и измеряемого объекта в одной плоскости. Путем передвижения окуляра добиваемся по возможности резкого изображения. Далее вращением реостата достигаем того, чтобы изображение нити совпало по яркости с измеряемым объектом («растворилось» в нем).

Можно рекомендовать перед началом измерения устанавливать реостат на примерно ожидаемую температуру, что сокращает время наводки. Оптическая система пирометра позволяет измерять температуру на расстоянии $0,7\text{ м}$ и более от объектива прибора до источника излучения.

Основными недостатками оптических пирометров являются невозможность автоматической записи показаний и использова-

ние их в системах автоматического регулирования. Особенно следует отметить неизбежность ошибок, связанных с субъективными качествами наблюдателя (его добросовестности, способности различать световые оттенки и др.). При всех обстоятельствах систематический контроль за работой пирометристов совершенно необходим.

Фотоэлектрические пирометры. Такие приборы часто используют для измерения температуры чугуна в ковше. В этом случае степень черноты жидкого металла зависит от степени окисления и структуры окислов и может изменяться в значительных пределах. Для чугуна при достижении некоторой предельной температуры ($\sim 1300^\circ\text{C}$) величина степени черноты резко понижается с 0,9 до 0,2—0,3, что делает результаты измерения температуры металла в ковше недостаточно надежными.

Фотоэлектрические приборы (ФЭП) являются приборами частичного излучения. Интенсивность монохроматического излучения измеряется при помощи фотоэлемента. Основным преимуществом фотопирометра по сравнению с оптическим является возможность регистрации показаний и использования в системах автоматического регулирования. Зависимость от наблюдателя при этом исключается.

Приборы типа ФЭП снабжены красным светофильтром, рассчитанным на длину волны $\lambda = 0,65$ мкм, что соответствует характеристике сурьмяно-цезиевого фотоэлемента. В условиях эксплуатации ФЭП систематически проверяют с помощью оптического пирометра.

Принципиальная схема фотоэлектрического пирометра приведена на рис. 79. Световой поток от источника излучения проходит последовательно через объектив 1, диафрагму 2, красный светофильтр 3 и поступает в сурьмяно-цезиевый фотоэлемент 4. Одновременно на тот же фотоэлемент подается световой поток от лампы обратной связи 9. Специальное приспособление 10 (модулятор) при помощи вибрирующей заслонки поочередно подает световые потоки с частотой объекта измерения и от лампы обрат-

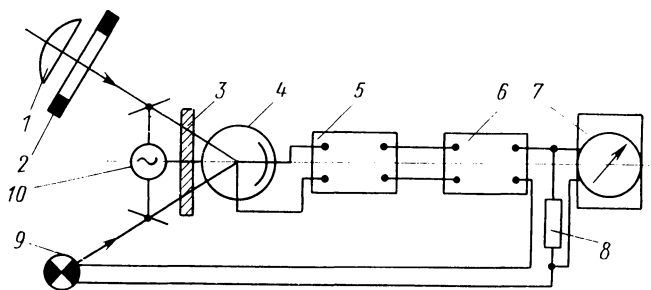


Рис. 79. Принципиальная схема фотоэлектрического пирометра

ной связи. Фазы этих световых потоков сдвинуты на 180° . При измерении интенсивности излучения фотоэлемента появляется ток пропорциональной разности потоков.

Ток фотоэлемента поступает в усилитель 5 и после него направляется в силовой блок 6. На выходе из блока включена лампа обратной связи 9. Ток лампы обратной связи пропорционален изменению интенсивности излучения и соответственно измеряемой температуре. Последовательно с лампой обратной связи подключено калиброванное сопротивление 8. Падение напряжения в этом сопротивлении измеряется быстродействующим электронным потенциометром 7.

Применение световой обратной связи уменьшает погрешности, связанные с изменением характеристики фотоэлемента, изменением напряжения питания и других параметров.

Цветовые пирометры. Основным преимуществом цветковых пирометров является значительное уменьшение погрешности, связанной с введением поправки на степень черноты. Однако они не получили большого распространения. По мнению авторов, цветковые пирометры, обеспечивающие наиболее точное измерение температуры расплавленных металлов, весьма перспективны. По этой причине ниже рассмотрен принцип действия и устройство цветковых пирометров.

Принцип действия цветковых пирометров заключается в следующем. Измеряется интенсивность монохроматического излучения нагретого тела при одной и той же истинной температуре при двух длинах волн через синий и красный светофильтры.

Согласно формуле Вина имеем

$$\left. \begin{aligned} E_{\lambda_1} &= \varepsilon_{\lambda_1} \frac{C_1 \lambda_1^{-5}}{e^{C_2/\lambda_1 T}}, \\ E_{\lambda_2} &= \varepsilon_{\lambda_2} \frac{C_1 \lambda_2^{-5}}{e^{C_2/\lambda_2 T}}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

здесь E_{λ_1} и E_{λ_2} — интенсивности излучения при длинах волн λ_1 и λ_2 ; C_1 и C_2 — постоянные коэффициенты в формулах Планка и Вина; ε_{λ_1} и ε_{λ_2} — монохроматические коэффициенты черноты.

Основное допущение, положенное в основу работы цветковых пирометров, заключается в том, что коэффициенты черноты ε_λ одинаковы при излучении с разными длинами волн. Тела, обладающие такими свойствами, называют серыми. Многие реальные тела достаточно близки по своим свойствам к серым телам. К ним можно отнести окислы металлов, керамику, огнеупорные и графитовые изделия и др.

Из (7), принимая $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$, можно получить

$$T = C_2 \frac{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}}{5 \ln \frac{E_{\lambda_1}}{\lambda_1} - \ln \frac{E_{\lambda_2}}{\lambda_2}} \quad (8)$$

Таким образом, измеряя интенсивности излучения при двух длинах волн, можно по формуле (8) подсчитать так называемую цветовую температуру T , которая, как указано выше, мало отличается от истинной.

Для автоматического измерения цветовой температуры используют пирометр ЦЭП-3, упрощенная принципиальная схема которого представлена на рис. 80. На пути светового потока между объективом 1 и фотоэлементом 3 помещен обтюратор 2 — вращающийся диск с красными и синими светофильтрами. Получающиеся импульсы после усилителя 4 попеременно поступают в счетно-решающее устройство 5, на выходе из которого находится потенциометр 6. Электродвигатель 7 вращает диск обтюратора и одновременно коллекторный переключатель 8. Последний предназначен для передачи информации счетно-решающему устройству о смене цвета монохроматического светофильтра.

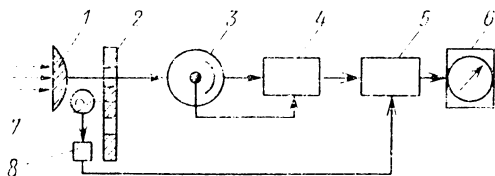


Рис. 80. Принципиальная схема цветового пирометра

Радиационные пирометры. В отличие от пирометров частичного излучения радиационными пирометрами измеряют полную энергию излучения нагретого тела. Тепловой поток концентрируется с помощью собирающей линзы на теплоприемнике, который представляет собой ряд миниатюрных последовательно соединенных термопар. Температура нагретого тела пропорциональна термо-э. д. с. термопары теплоприемника, которую измеряют милливольтметрами или потенциометрами.

Полное количество энергии, излучаемое абсолютно черным телом на всех длинах волн, определяют путем интегрирования уравнения Планка. После соответствующих преобразований при этом получают известный закон Стефана-Больцмана, который для реальных тел выражается следующим образом:

$$E = \varepsilon C_0 (T, 100)^4 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч)},$$

где ε — степень черноты при полном излучении; C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; $C_0 = 4.9 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{K}^4)$.

Раднационные пирометры градуируют по излучению абсолютно черного тела. Поправку на неполноту излучения подсчитывают по формуле

$$T_{\text{ист}} = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon}},$$

где $T_{\text{ист}}$ и T_p — истинная и радиационная (показываемая прибором) температуры, К; ϵ — степень черноты в условиях полного излучения.

При малых значениях ϵ поправка на показания может достигать больших значений. Например, при $\epsilon = 0,1$ $\frac{T_{\text{ист}}}{T_p} = \sqrt[4]{\frac{1}{0,1}} = 1,78$, т. е. разница $\frac{T_{\text{ист}} - T_p}{T_{\text{ист}}}$ составляет 78%. Основная погреш-

ность возникает из-за того, что ϵ зависит от многих факторов и колеблется в широких пределах, поэтому радиационными пирометрами измеряют обычно температуру в условиях, приближающихся к излучению абсолютно черного тела.

Неоднократные попытки использования радиационных пирометров для измерения температуры расплавленного чугуна оказались неоправданными из-за неопределенности поправок на неполноту излучения и связанной с этим необходимостью частых проверок показаний термопарам погружения.

Термопара кратковременного погружения. Для измерения температуры расплавленного металла более целесообразно применение термопар кратковременного погружения по сравнению с пирометрами излучения. Сущность метода заключается в одновременном измерении температуры металла термопарой, рабочий конец которой имеет защиту от химического воздействия металла и теплового удара. После замера рабочий конец термопары разрушается и должен восстанавливаться за счет запаса термоэлектродной проволоки в катушках, которые находятся в головке термопары.

Отечественной промышленностью выпускаются следующие виды термопар погружения для измерения температуры расплавленного металла: платино-платинородневые (ПП), платинородий-платинородневые градуировки Пр 30/6; вольфрам-ренийевые (ВР) и вольфрам-молибденовые (ВМ).

Платинородий-платинородневые термопары предназначены для измерения температуры расплавленных стали и чугуна, выплаиваемых в индукционных электродуговых и мартеновских печах в комплекте с электронными потенциометрами. Термопары имеют следующую характеристику: пределы измерения 1300—1700°C; защита горячего спая кварцевым наконечником; длительность погружения до 2 мин; длина термопары 3000—3500 мм.

Преимуществом платинородий-платинородневых термопар является возможность работы без компенсационных проводов, а

также стабильность характеристик. Их применение ограничено из-за относительно высокой стоимости сплавов драгоценных металлов.

Вольфрам-ренийевые термопары (ТВР-251 и ТВР-299) нестандартны и предназначены для измерения температуры в электрических высокотемпературных печах. Возможно использование термоэлектродной вольфрамо-рениевой проволоки и для измерения температуры расплавленного металла с предельными температурами 1800—1950°C. Преимущества и недостатки их такие же, что и в предыдущем случае.

Наиболее распространены вольфрам-молибденовые термопары погружения (табл. 63).

63. Основные типы вольфрам-молибденовых термопар погружения

Тип	Применение	Рабочая длина термопары, мм
ТПП-290	Ванны электродуговых печей емкостью до 15 т	2700
ТПП-290-а	То же при емкости более 15 т	3500
ТПК-291	Ковши электродуговых печей емкостью до 15 т	2400
ТПК-291-а	То же при емкости более 15 т	3000
ТПИ-292	Тигли индукционных печей емкостью до 0,2 т	3500
ТПИ-292-а	То же емкостью более 0,2 т	4300

Как следует из данных, приведенных в табл. 63, для измерения температуры расплавленного чугуна при использовании индукционных печей как самостоятельно, так и при дуплекс-процессе в основном приборами применяют вольфрам-молибденовые термопары погружения. Термопары погружения ВМ в отличие от термопар ПП, хорошо работающих в восстановительной среде, имеют пределы измерения 1400—1800°C. Стандартные термопары снабжаются кварцевыми защитными наконечниками, рассчитанными на длительность погружения 15—20 с. Длина каждого из термоэлектродов, включая запас в головке, 20 ± 2 м. Термопары ВМ по характеристике не стандартны. Каждая партия термоэлектродной проволоки имеет индивидуальную градуировку, которую посылают вместе с паспортом. Градуировки имеют небольшие расхождения между собой, но пренебрегать ими нельзя. Отличительной особенностью термопар ВМ является смена полярности при температуре около 1300°C.

Термо-э. д. с., развиваемая термопарами ВМ, мала и составляет 4,5 мВ при температуре 2000°C. По этой причине к термопарам ВМ присоединяют измерительные приборы (потенциометры) повышенной чувствительности. Для термопар ВМ применяют специальные компенсационные провода (медь — сплав меди

с никелем). Можно использовать также компенсационные провода для термопар ПП, подсоединяя их с обратной полярностью.

На рис. 81 приведена конструкция термопары кратковременного погружения. В головке термопары 1 находится запас проводов к двум катушкам. Термопара присоединяется к потенциометру при помощи гибких соединительных проводов 2. Изменение сопротивления внешней цепи путем уменьшения запаса проводов в катушках не влияет на показания прибора, так как сопротивление подводящих проводов, как известно, не отражается на показаниях потенциометров. Рабочий конец термопары 3 находится внутри защитного колпачка 4. Колпачок при помощи промежуточной пробки из огнеупорной глины 5 укрепляется в графитовом или стальном защитном блоке 6. Блок 6 предназначен для предохранения рабочего конца при прохождении через слой шлака. Провода термопары помещаются внутри стальной трубы 8 и изолируются двухканальными трубками 7 или бумажными.

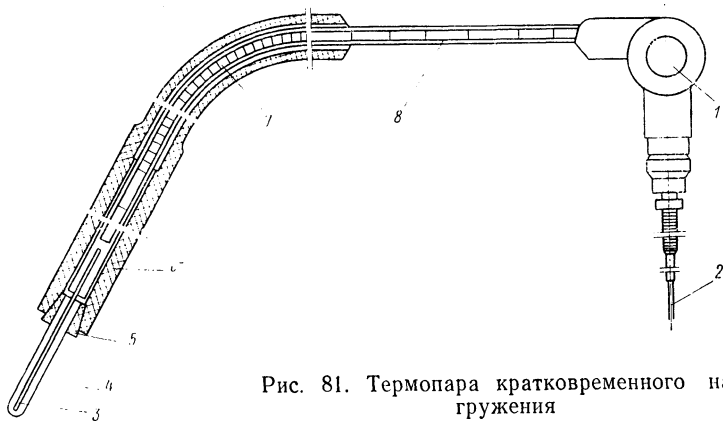


Рис. 81. Термопара кратковременного погружения

В качестве измерительных приборов для термопар ВМ применяются специальные типы электронных потенциометров (ЭПС-360, БП-6105 и др.). Шкала приборов от $-0,5$ до $+3,5$ мВ. Диаграмма для записи показаний — дисковая — дает один оборот за 6 мин. Прибор снабжен приспособлением для сигнализации об окончании замера. При замере рабочий конец опускается на ~ 400 мм ниже слоя шлака. При температуре выше 1000°C прибор включается и автоматически выключается при этой температуре с помощью специального приспособления.

Длительность пребывания термопары в ванне расплавленного металла определяется в большей степени стойкостью защитного колпачка. Применение колпачков из алунда, дибарида циркония, дибарида циркония с молибденом и из других материалов, а также комбинированных многослойных колпачков увеличивает время нахождения термопары в расплавленном металле до

2,5 ч, что создает предпосылки для длительного измерения температуры непосредственно в ванне [23].

Другим направлением является создание конструкций блоков термопар с одноразовым использованием. Примерами таких конструкций являются термопары со сменными бумажными блоками, разработанные во ЦНИИЧЕРМЕТ [8], и «бомбовые» термопары, широко используемые в Японии для конвертерного процесса.

Количество замеров, которое можно произвести одной термопарой ВМ, неопределенно. Считают обычно, что температуру стали можно измерять 1 раз, жидкого чугуна 5 раз и более. Следует учитывать то обстоятельство, что при повторных замерах градуировка термопары меняется.

Примерные удельные расходы вольфрамовой и молибденовой проволоки и кварцевых колпачков приведены в табл. 64.

64. Нормы расхода термоэлектродной проволоки и кварцевых колпачков (мг) на 1 т жидкого металла

Емкость ковшей и других емкостей жидкого металла, т	Сталь		Чугун		Сталь	Чугун
	Вольфрам	Молибден	Вольфрам	Молибден	Колпачки	
До 1	280	148	140	74	240	100
1 — 10	58	35	30	16	48	20
10 — 100	4,5	2,4	3,6	1,6	5	2
100	1,5	0,8	0,8	0,4	1,0	0,5

В принципе можно отказаться от систематического измерения температуры металла, если известна зависимость конечной температуры металла от количества электрической энергии, расходуемой индукционной печью. Зависимость эту определяют экспериментальным путем, как среднее из большого количества измерений и при изменении технологического режима ее, безусловно, следует устанавливать заново.

По образцу автоматических устройств, отключающих подачу кислорода в конвертеры [3], возможна установка аналогичных приспособлений, отключающих подачу электрической энергии по достижении определенного расхода и соответственно предельной температуры.

Схема электрического питания индукционных печей позволяет сравнительно легко осуществить автоматическое регулирование температуры в ванне. Вопрос осложняется из-за отсутствия

надежного длительно работающего датчика. Представляется возможным использование устройства для автоматического непрерывного измерения температуры металла с размещением термопары в кладке. При этом необходимо экспериментально определить влияние наведенных токов на показания приборов.

4. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ

Индукционные печи размещают в зависимости от их назначения и планировки цеха. Для вновь строящихся цехов можно рекомендовать следующие компоновки плавильных агрегатов. Для тигельных индукционных печей, работающих в паре с канальными, наиболее удобно для подачи шихты и металла размещение их по фронту параллельно шихтовому двору и перпендикулярно формовочным линиям (рис. 82), что обеспечивает транспортные операции с шихтой и жидким металлом по кратчайшим расстояниям.

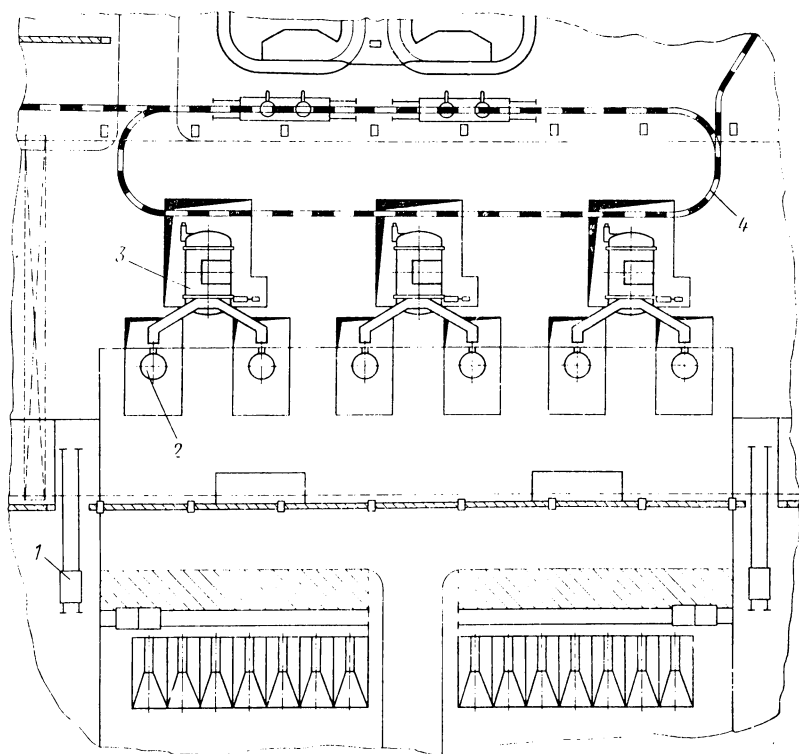


Рис. 82. Пример расположения оборудования при дулекс-процессе вальцовки — канальная печь (завод фирмы Крейслер):

1 — подача шихты; 2 — индукционная печь емкостью 25 т; 3 — канальная печь 45/12;
4 — заливочный монорельс

Для дуплекс-процесса вагранки с канальной печью в качестве типовой компоновки можно рекомендовать планировку плавильных агрегатов, приведенную на рис. 83. В этом случае ме-

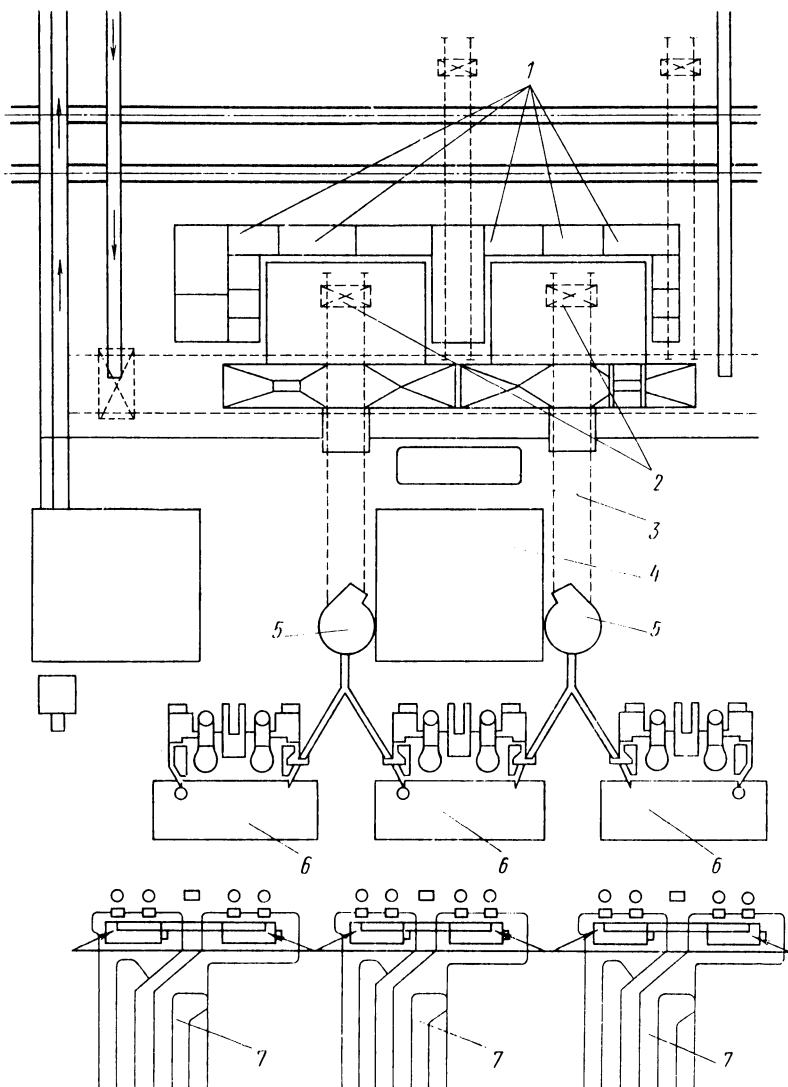


Рис. 83. Пример расположения оборудования при дуплекс-процессе вагранка — канальная печь:

1—бункеры для металлозавалки; 2—весовые бункеры; 3—скиповый подъемник; 4—пульт управления и приборы контроля; 5—вагранки; 6—индукционные канальные печи; 7—формовочные линии и заливочные конвейеры

талл из вагранки в канальную печь можно передавать самотеком по желобу.

Установка индукционных печей по высоте возможна как выше, так и ниже нулевой отметки. В первом случае достигается большая безопасность, так как отсутствует прямой, который может быть заполнен водой из-за аварии системы охлаждения.

В старых цехах при недостаточной высоте цеха прибегают к заглублению печей ниже нулевой отметки с устройством гидроизолированных приемков.

Количество фундаментных гнезд для тигельных и канальных печей может быть принято по двум вариантам. В первом принимают число фундаментов по количеству рабочих и запасных печей, в результате плавка металла и набивка футеровки выполняются на одном и том же месте. Во втором, как правило, при недостаточной площади плавильного участка, фундаменты делают только для печей, которые находятся в рабочем режиме, а запасные тигли устанавливают в стороне, где производят их набивку и ремонт.

Грузоподъемность мостовых кранов плавильного участка должна обеспечить перемещение футерованного тигля, масса которого может достигать 50 т и более.

Интенсивное перемешивание металла в индукционных печах промышленной частоты повышает требования к надежности футеровки и требует строгого соблюдения правил ее эксплуатации.

В частности, это относится к тепловой выдержке тигля, неправильное выполнение которой может полностью вывести из строя футеровку тигля.

При остановке индукционной тигельной печи на выходные дни необходимо выдать из нее полностью жидкий металл и после осмотра тигля установить на подину пусковой слиток. Пусковой слиток получают заливкой в изложницы или в специальные формы остатков металла из заливочных и передаточных ковшей (рис. 84). Для легкого извлечения пускового слитка из изложницы и увеличения срока службы ее обмазывают слоем глины.

После установки на дно тигля пускового слитка на него ставят цилиндр тепловой выдержки (рис. 85). Температуру тигля доводят до 800—1000°C включением печи на необходимую мощность. Понижение температуры тигля ниже 800°C недопустимо, так как это приводит к образованию трещин футеровки тигля в результате структурных превращений кварца (рис. 86). При температуре выше 1000°C цилиндр тепловой выдержки может расплавиться, что также нежелательно, ибо его обычно используют многократно. Кроме того, необходимо следить, чтобы пусковой слиток не сплавился с цилиндром тепловой выдержки, так как это приведет к затруднениям при извлечении из печи и при по-

следующем использовании цилиндра. Масса цилиндра тепловой выдержки 3 т для тигельной печи емкостью 12 т и 5 т для тигельной печи емкостью 25 т.

Если цилиндров тепловой выдержки в наличии нет, то можно загрузить в тигель тяжеловесную шихту и, включив печь, выдерживать температуру шихты также в пределах 800—1000°C.

Если при аварийной остановке индукционной печи слить остатки металла из нее невозможно, то нужно заморозить жидкий металл присадкой шихтовых материалов и, догрузив печь шихтой, перейти на режим тепловой выдержки.

Тепловую выдержку тигельных печей можно проводить и на расплавленном металле, не допуская его перегрева, чтобы избежать преждевременного износа футеровки. В этом случае тепловую выдержку осуществляют на второй-четвертой ступенях трансформатора при закрытой крышке тигля. Выдержка жидкого металла в канальной печи может достигать нескольких месяцев. Температура тепловой выдержки во всех случаях контролируется термопарой с записывающим прибором.

При эксплуатации индукционных печей возможны выбросы металла из тигля при разрушении футеровки и при загрузке сырой шихты в жидкий металл, поэтому в первую очередь необходимо следить за состоянием футеровки. Для этого печи оборудуют системами сигнализации разрушения футеровки, которые подробно рассмотрены в гл. II.

В процессе плавки нужно следить за температурой расплавленного металла и не допускать его перегрева выше 1500°C, что ведет к активному разрушению футеровки. Одновременно необходимо следить за оседанием твердой шихты в ванну металла, не допуская образования «мостов». Мостами называют места потери контакта между твердым и жидким металлом в результате заклинивания твердой шихты между стенками в верхней части тигля.

Образование мостов опасно тем, что теряется возможность визуального контроля за температурой жидкого металла, которая за небольшой промежуток времени может достичь опасных для стойкости футеровки значений. Во избежание образова-

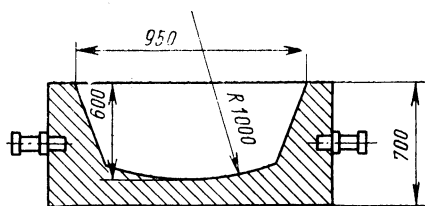


Рис. 84. Пусковой слиток

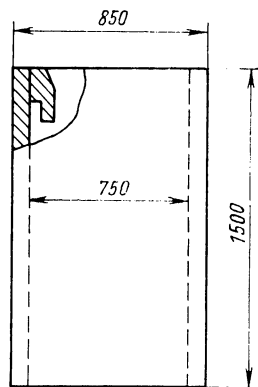


Рис. 85. Цилиндр тепловой выдержки



Рис. 86. Характер образования трещин футеровки

ния мостов шихту необходимо регулярно осаживать каким-либо грузом, например, при помощи пускового слитка.

После каждой выдачи металла следует осмотреть футеровку тигля для определения степени ее износа. Разъедание футеровки у подины является результатом слабой набивки, примерно в середине высоты тигля — результатом высокой температуры чугуна, в верхней части тигля — следствием большого количества шлака.

К работе на индукционных печах следует допускать рабочих, обученных правилам эксплуатации индукционных печей, имеющих удостоверение стропальщика по работе с грузоподъемными механизмами и удостоверение на работу с газопотребляющим оборудованием.

Перед началом работы необходимо проверить состояние тигля, заземление, подачу охлаждающей воды, работу системы сигнализации повреждения футеровки при помощи специального прибора.

Количество рабочих определяют в зависимости от размещения плавильных агрегатов. Для типовой планировки (см. рис. 82) применяют следующую расстановку рабочих на каждый блок, состоящий из двух тигельных и одной канальной печей:

- 1) плавильщик на тигельных печах;
- 2) подручный плавильщика;
- 3) плавильщик на канальной печи;

4) шихтовщик, в его обязанности входит также обслуживание печи для подогрева шихты;

5) крановщик шихтового двора;

6) крановщик плавильного участка.

В последнее время ряд западноевропейских фирм перешли на управление кранами по радио. В этом случае крановщики не требуются, так как кранами управляют основные рабочие: плавильщики и шихтовщики.

В рабочее время, т. е. когда печи включены в режим тепловой выдержки, за всеми плавильными агрегатами участка наблюдает один плавильщик. Обслуживание оборудования участка, состоящего из шести тигельных и трех канальных печей, осуществляется электромонтером и слесарем службы механика, которые имеют по одному помощнику. Они выполняют профилактические осмотры и текущие ремонты в одну смену. Контроль за системой охлаждения предусматривает непрерывное дежурство, так как прекращение подачи воды допустимо не более 20 мин. Набивку футеровки печи выполняет бригада из трех-четырех человек. На участке выделены места и помещения для ремонта изоляции индукторов, заварки индукторов и ремонта тиглей.

Глава VII

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАВКИ ЧУГУНА В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

Полная замена вагранок индукционными печами в чугунолитейных цехах машиностроительных предприятий приведет к существенным изменениям в народном хозяйстве в целом. Достаточно указать на коренное изменение балансов кокса, лома и литейного чугуна. Одновременно появится необходимость в увеличении производства карбюризаторов и футеровочных материалов и решении ряда других вопросов.

Подробное рассмотрение этих и других проблем должно стать темой детальных исследований и, естественно, не входило в задачу настоящей книги. Ниже рассмотрена структура себестоимости чугуна, выплавленного в индукционных печах, и дано сравнение с себестоимостью чугуна, выплавленного в вагранках. Одновременно приведены данные по себестоимости чугуна в условиях дуплекс-процесса. При этом использованы в основном материалы Автогаза, в которых все затраты учтены по существующим отпускным ценам исходя из того, что прибыль и другие экономические показатели промышленных предприятий определяют по отпускным ценам.

Необходимо сделать еще одно предварительное замечание.

Отпускные цены на электрическую энергию значительно изменяются в условиях применения двухставочного тарифа, в зависимости от того, в каком поясе находится потребитель и какова его максимальная нагрузка. Стоимость литейного кокса также не является постоянной. Все это может сильно влиять на величину заводской себестоимости чугуна и на эффективность от замены вагранок индукционными печами.

В условиях Автогаза используют следующие варианты плавки чугуна в индукционных печах:

1) получение синтетического чугуна СЧ 18-36 моно-процессом, используемого для отливок автомобильных деталей;

2) получение высокопрочного чугуна дуплекс-процессом индукционные печи — дуговые печи для отливок коленчатых валов;

3) получение синтетического чугуна дуплекс-процессом индукционные печи — каналные печи для отливок автомобильных деталей;

4) получение легированного чугуна типа нирезист моно-процессом для отливок гильз цилиндров.

С введением индукционной плавки появилась возможность переплава металлолома в широком диапазоне размеров — от крупных кусков до чугунной стружки, без предварительной подготовки. При этом увеличилось количество используемых легирующих элементов металлолома, так как окисление их при индукционной плавке незначительно (см. гл. III и V). В отличие от вагранки при индукционной плавке чугун не насыщается серой, улучшается структура чугуна и повышаются его прочностные свойства (см. гл. IV). Благодаря замене кокса электрической энергией при плавке чугуна также улучшается его качество.

Использование индукционных печей для получения синтетического чугуна позволяет применять дешевые стальные и чугунные отходы взамен доменного чугуна, что создает предпосылки для снижения себестоимости. Производство же синтетического чугуна в вагранках практически невозможно, так как расход кокса увеличивается при этом до 25—30%, вместо обычных 12—14%, а содержание серы в металле до 0,2—0,25%, что делает чугун непригодным для отливок.

В табл. 65 дано сравнение нормативной заводской себестоимости основных материалов, технологического топлива и электрической энергии на 1 т жидкого металла. Сравнение приведено при плавке чугуна в вагранке производительностью 20 т/ч и при получении синтетического чугуна в индукционной тигельной печи емкостью 12 т.

Аналогичное сравнение проводили и другие исследователи (табл. 66, 67).

Как видно из данных, приведенных в табл. 67, снижение себестоимости в процентах примерно одинаково. Несколько меньшее снижение можно объяснить большим удельным расходом

**65. Сопоставление нормативной себестоимости основных материалов
и технологического топлива на 1 т жидкого чугуна СЧ 18-36**

Статьи расхода	Цена за 1 т, руб.	Плавка в вагранке		Плавка в индукционных печах на синтетический чугун	
		Количес- тво, кг	Стоимость	Количество, кг	Стоимость
Металлозавалка					
Литейный чугун:					
ЛК10	80	180	14 р. 40 к.	—	—
ЛК1-2	70	265	18 р. 55 к.	—	—
Передельный чугун . .	60	125	7 р. 50 к.	—	—
Ферросилиций ФС18 . .	80	10	80 к.	—	—
Стружка:					
брикетированная . .	32	60	1 р. 92 к.	—	—
россыпью	23	—	—	300	6 р. 90 к.
Стальные отходы . . .	24	40	96 к.	—	—
То же	36	—	—	300	10 р. 80 к.
Оборотный металл . .	50	320	16 р.	400	20 р.
Итого	—	1000	60 р. 13 к.	1000	37 р. 70 к.
Флюсы-раскислители					
Известняк	3	40	12 к.	—	—
Ферросилиций:					
ФС75	210	0,15	3,2 к.	—	—
ФС45	130	—	—	12	1 р. 56 к.
Алюминий	500	0,1	5 к.	—	—
Апатитовая руда . . .	8	5	4 к.	—	—
Графитовый бой . . .	50	—	—	12	60 к.
Итого	—	—	24,2 к.	—	2 р. 16 к.
Угар, %		5,0		4,0	
Основные материалы на 1 т жидкого чугуна . .	—	—	63 р. 55 к.	—	41 р. 52 к.
Кокс на 1 т жидкого чу- гуна	60	148,4	8 р. 90 к.	—	—
Электроэнергия 1000 кВт·ч	9,2	—	—	700	6 р. 44 к.
Общая стоимость на 1 т жидкого чугуна . . .	—	—	72 р. 45 к.	—	47 р. 96 к.

66. Сопоставление себестоимости сыпчатого чугуна, полученного в вагранке и в индукционной тигельной печи в условиях завода «Водоприбор» (г. Москва)

Статья расхода	Цена за 1 т, руб.	Плавка в вагранке		Плавка в индукционной печи	
		Количество, т	Стоимость	Количество, т	Стоимость
Чугун литейный	70,0	0,577	40 р. 40 к.	—	—
Лом чугушный	42,9	0,245	10 р. 51 к.	—	—
Высечка динамной и трансформаторной сталей	28,1	—	—	0,806	22 р. 65 к.
Карбюризатор	7,0	—	—	0,033	23 к.
Ферросилиций	75,0	0,062	4 р. 65 к.	—	—
Силикокальций	447,0	—	—	0,008	3 р. 58 к.
Лом чугушный — возврат собственного производства	38,5	0,176	6 р. 78 к.	0,176	6 р. 78 к.
Флюсы и добавочные материалы	5,4	0,015	8 к.	—	—
Футеровочная масса	20,0	—	—	0,0102	20 к.
Борная кислота	1460,0	—	—	0,0005	73 к.
Шамотный кирпич	33,0	0,0045	15 к.	—	—
Глина огнеупорная	5,6	0,609	5 к.	—	—
Транспортные расходы по покупным материалам	—	—	1 р. 36 к.	—	1 р. 74 к.
Зарплата с начислением	—	—	1 р. 93 к.	—	1 р. 15 к.
Охлаждающая вода	0,2	3,5	70 к.	6,9	1 р. 38 к.
Амортизация оборудования	—	—	43 к.	—	2 р. 47 к.
Текущий ремонт	—	—	18 к.	—	8 к.
Электроэнергия	0,015	25,9	39 к.	700	10 р. 50 к.
Кокс	52,0	0,167	8 р. 68 к.	—	—
Итого на 1 т:					
жидкого чугуна	—	—	76 р. 29 к.	—	51 р. 49 к.
отливок	—	—	92 р. 50 к.	—	62 р. 40 к.

67. Сравнение заводской себестоимости жидкого чугуна, получаемого в вагранках и в индукционных печах

Завод или источник	Себестоимость 1 т жидкого чугуна	
	Вагранка	Индукционная печь
Автогаз	72 р. 45 к.	47 р. 96 к.
„Водоприбор“ (г. Москва)	72 р. 29 к.	52 р. 11 к.
[45]	75 р. 6 к.	53 р. 15 к.
[66]	284,77 франков	204,99 франков

электрической энергии и ее отпускной стоимости (1190 кВт·ч/т и 1,6 к/кВт·ч).

Определенный интерес представляют зарубежные данные. Несмотря на специфические особенности капиталистической экономики, снижение удельного расхода примерно на том же уровне. Правда, необходимо отметить, что по тем же данным, при переводе кислой вагранки на горячее дутье стоимость 1 т жидкого чугуна также снижается до 200,18 франков. Это доказывает, что в определенных условиях усовершенствованная вагранка может, по-видимому, конкурировать с индукционной электропечью.

Материалов по сравнительной себестоимости в условиях дуплекс-процессов опубликовано мало, поэтому при дальнейшем изложении использованы материалы ГАЗа. Эффективность замены вагранки в дуплекс-процессе вагранка — кавальная печь индукционной тигельной печью иллюстрируется табл. 68.

Как следует из данных, приведенных в табл. 68, замена вагранки в дуплекс-процессе на тигельную индукционную печь обеспечивает снижение себестоимости 1 т жидкого чугуна на 5,4%.

Для получения коленчатых валов из высокопрочного чугуна на Автогазе используют дуплекс-процесс тигельная индукционная плавильная печь — дуговая электропечь. В табл. 69 дано сравнение применяемого дуплекс-процесса с процессом, при котором плавление металла вместе индукционной печи осуществляется в дуговой печи на твердой закатке. В рассматриваемом случае использование индукционного плавильного агрегата даст значительную экономическую эффективность.

Приведенные примеры не являются исчерпывающими. Соотношение отдельных составляющих и структура себестоимости могут несколько изменяться в каждом конкретном случае, однако общая тенденция к ощутимому снижению себестоимости жид-

68. Сравнение себестоимости 1 т жидкого чугуна СЧ 18-36, выплавляемого дуплекс-процессом при использовании канальных печей

Статья расхода	Вагранка 20 т/ч— канальная печь	Тигельная печь 25 т— канальная печь
Материалы	60 р. 35 к.	57 р. 87 к.
Кокс	9 р. 46 к.	7 р. 43 к.
Зарплата:		
основная	37 к.	70 к.
дополнительная	9 к.	10 к.
Отчисления по соцстраху	4 к.	6 к.
Износ инструмента и приспособлений	6 к.	7 к.
Амортизация оборудования	2 р. 40 к.	2 р. 55 к.
Цеховые расходы	1 р. 51 к.	1 р. 51 к.
Общезаводские расходы	25 к.	25 к.
Итого	74 р. 53 к.	70 р. 54 к.

кого чугуна и чугуниного литья остается неизменной во всех рассмотренных случаях.

Каковы же пути к снижению себестоимости жидкого чугуна, получаемого в индукционной плавильной печи? В первую очередь, это увеличение производительности плавильных агрегатов. В этом случае снижаются удельные расходы электроэнергии и уменьшается влияние постоянной составляющей.

Характерной особенностью структуры себестоимости жидкого чугуна, получаемого в индукционных тигельных печах, является большой удельный вес условно-переменной составляющей. К ней относится в основном, стоимость шихтовых материалов и электроэнергии. Остальные составляющие можно с известной степенью приближения считать постоянными. Зная величины условно-переменной и условно-постоянной составляющих, можно примерно определить ожидаемую себестоимость при изменении производительности. Примем, что зависимость абсолютных затрат P от производительности B прямолинейна. В этом случае используем зависимость

$$P = P_0 + p_1 B, \quad (9)$$

где P_0 — условно-постоянная составляющая абсолютных расходов, руб/т; p_1 — коэффициент пропорциональности, равный переменной составляющей. Себестоимость (руб/т) получается, если правую часть уравнения (9) разделить на B .

69. Сравнение нормативной себестоимости основных материалов и технологической электроэнергии на выплавку 1 т высокопрочного чугуна

Статья расхода	Цена за 1 т, руб.	Плавка в дуговых печах на твердой заливке		Плавка дуплекс-процессом индукционная — дуговая печь	
		Количество, кг	Стоимость	Количество, кг	Стоимость
Металлозавал					
Литейный чугун ЛК1-2	70	550	38 р. 50 к.	144	10 р. 08 к.
Ферросилиций ФС45	130	4,5	59 к.	15,9	2 р. 07 к.
Ферромарганец	210	6,5	1 р. 36 к.	6,8	1 р. 43 к.
Феррохром ФХ006	170	2,0	34 к.	1,3	22 к.
Стружка россыпью	23	—	—	100	2 р. 30 к.
Стальные отходы	36	—	—	250	9 р.
Оборотный металл	50	437	21 р. 85 к.	482	24 р. 10 к.
Итого	—	1000	62 р. 64 к.	1000	49 р. 20 к.
Флюсы и раскислители					
Ферросилиций ФС75	210	5	1 р. 05 к.	5	1 р. 05 к.
Алюминий	500	0,1	5 к.	0,1	5 к.
Известь (комовая)	23	30	69 к.	30	69 к.
Плавиковый шпат	130	6	78 к.	6	78 к.
Древесный уголь	85	2	17 к.	2	17 к.
Графитовый бой	50	5	25 к.	13	65 к.
Магний	760	2,3	1 р. 75 к.	2,3	1 р. 75 к.
Итого	—	—	4 р. 74 к.	—	5 р. 14 к.
Всего на 1 т металлозавалки	—	—	67 р. 38 к.	—	54 р. 34 к.
Угар, %	—	10		4	
Стоимость основных материалов с флюсами на 1 т жидкого чугуна	—	—	74 р. 86 к.	—	56 р. 60 к.
Электроды	400	11	4 р. 40 к.	5	2 р.
Электроэнергия 1000 кВт·ч:					
на индукционные печи	9 р. 20 к.	—	—	700	6 р. 44 к.
на дуговые печи	9 р. 20 к.	907	8 р. 34 к.	300	2 р. 76 к.
Общая себестоимость на 1 т жидкого чугуна	—	—	86 р. 60 к.	—	67 р. 80 к.

$$p = \frac{P}{B} = \frac{P_0}{B} + p_1.$$

Отсюда следует, что с повышением производительности B удельные расходы снижаются. Приведем конкретный пример.

Себестоимость, приведенная в табл. 66, рассчитана исходя из производительности 14 000 т/год жидкой стали. Переменная составляющая $p_1 = 43,76$ руб/т; постоянная составляющая $P_0 = (52,11 - 43,76) \cdot 14\,000 = 118 \cdot 10^3$ руб/год, откуда

$$p = 43,76 + \frac{118 \cdot 10^3}{B}.$$

Если, например, годовая производительность снизится до 10 000 т/год, то себестоимость увеличится: $p = 43,76 + \frac{118}{10} = 55,56$ руб/т вместо исходных 52,11 руб/т.

Фактически себестоимость будет еще больше из-за неизбежного повышения удельного расхода электроэнергии. Опыт показывает, что рассмотренный метод прогнозирования при отсутствии коренных изменений технологического процесса дает результаты, близкие к фактическим данным.

Пути повышения производительности общезвестны — это сокращение простоев и холостых ходов, уменьшение брака, увеличение загрузки агрегатов, сокращение сроков ремонтов и другие организационные мероприятия.

Если принять переменные расходы за 100%, то на долю основных материалов приходится во всех случаях ~ 80 —90%. Отсюда следует, что при планировании снабжения индукционных печей необходимо заботиться о том, чтобы в состав шихты входили наиболее дешевые исходные материалы. Как указывалось выше, основным преимуществом этих печей является возможность использования металлоотходов, стружки и других аналогичных материалов.

На долю электрической энергии в нормативной себестоимости падают остальные 10—20%. Методы снижения удельных расходов рассмотрены подробно в гл. V. Если принять долю электроэнергии 15%, то снижение удельного расхода с 700 до 650 кВт·ч/т дает уменьшение нормативной себестоимости:

$$15 \frac{700 - 650}{700} = 3\%.$$

Приведенный оценочный расчет показывает, что наибольшей эффективности можно добиться в области снижения расходов на основные материалы. Однако необходимо отметить, что мероприятия по снижению расхода электроэнергии помимо снижения себестоимости имеют большое государственное значение, и проведение их во всех случаях совершенно обязательно. Особо следует рекомендовать предварительный подогрев шихты,

который помимо снижения расхода электрической энергии дает определенные технологические выгоды (см. гл. V).

Экономическую эффективность капиталовложений оценивают путем определения срока окупаемости капитальных затрат $T_{ок}$ и обратной величиной $K_{эфф} = \frac{1}{T_{ок}}$, которую называют коэффициентом эффективности капиталовложений:

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2}, \quad (10)$$

где K_2 и K_1 — соответствующие удельные капиталовложения; C_2 и C_1 — снижение себестоимости, руб/т.

Для печи ИЧТ-10, например, удельные капиталовложения на плавильный агрегат при производительности 3,3 т/ч могут быть оценены $K_2=18,5$ руб/т. Для вагранки современного типа с подогревом дутья $K_1=6,0$ руб/т. Принимая на основании табл. 65 $C_1 - C_2=24,5$ руб/т, получим

$$T_{ок} = \frac{18,5 - 6,0}{24,5} = 0,5 \text{ года}.$$

Произведенный подсчет, естественно, носит ориентировочный характер. При других значениях составляющих, входящих в формулу (10), можно получить другую величину. Однако имеются основания предполагать, что она во всех случаях будет находиться в пределах нормальных сроков окупаемости в машиностроении, которые составляют 3—5 лет.

Общие выводы сводятся к следующему: замена вагранок индукционными плавильными агрегатами дает, как правило, экономическую эффективность, которая выражается в значительном снижении заводской себестоимости при небольшом сроке окупаемости капитальных затрат. Это возможно при наличии на промышленном предприятии достаточного количества чугунных и стальных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беренс Л. В., Фельдуус Х. Г. Проблема теплоизоляции в набивных индукционно-тигельных печах.— «Международный журнал по электротермии», 1965, № 12, с. 519—524.
2. Брокмайер К. Индукционные плавильные печи. Пер. с нем. М., «Энергия», 1972. 304 с.
3. Бубенков А. И., Сокур А. И., Гамбаров В. И. Автоматический контроль и регулирование в кислородно-конвертерных цехах. Киев, «Техника», 1968, 79 с.
4. Вайнберг А. И. Индукционные плавильные печи. М., «Энергия», 1967, 416 с.
5. Высокоглиноземистые набивные футеровки индукционных тигельных печей для плавки синтетического чугуна.— «Литейное производство», 1971, № 1. 1—5 с. Авт.: Е. Л. Фишкин, Д. П. Иванов, Г. Ф. Горбульский и др.
6. Гордов А. Н. Основы пирометрии. 2-е изд. М., «Металлургия», 1971. 448 с.
7. Исаченко В. Н., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. 3-е изд. М., «Энергия», 1975. 488 с.
8. Измерение температуры жидкой стали при помощи термоэлектрического термометра со сменным блоком.— «Сталь», 1972, № 1, с. 37—40. Авт.: Л. А. Чарихов, С. К. Данюшевский, В. С. Журавлев и др.
9. Иванов Д. П., Коган Л. Б., Горбульский Г. Ф. Исследование и промышленное освоение производства синтетического чугуна в индукционных печах.— «Литейное производство», 1970, № 4.
10. Использование чугунной стружки при выплавке чугуна в индукционных печах.— «Литейное производство», 1966, № 8, 12—13 с. Авт.: И. И. Наваситис, И. И. Моцкайтис, М. В. Женис и др.
11. Качанов В. Ю., Блинов О. С., Беленький А. М. Автоматизация управления металлургическими печами. М., «Металлургия», 1974, 416 с.
12. Коган Л. Б. Проблемы технологии плавки синтетического чугуна.— «Литейное производство», 1973, № 8, с. 24—26.
13. Лифшиц Б. Г. Металлография. М., «Металлургия», 1971, 405 с.
14. Материальный баланс плавки в индукционной тигельной печи.— «Литейное производство», 1975, № 3. Авт.: А. А. Скворцов, Е. М. Китаев, Е. Н. Чернышев и др.
15. Мукосеев Ю. Л. Электроснабжение промышленных предприятий. М., «Энергия», 1973, 584 с.
16. Павлов М. А. Металлургия чугуна. Ч. II, М., Металлургиздат, 1949, 628 с.
17. Платонов Б. П. Применение индукционных плавильных печей промышленной частоты в дулекс-процессах.— «Литейное производство», 1968, № 10, с. 22—25.
18. Платонов Б. П., Алымов Н. И. Десульфурация чугуна в индукционных печах с кислой футеровкой.— «Литейное производство», 1972, № 7, с. 10—12.

19. Платонов Б. П. Плавка чугуна дуплекс-процессов.— «Литейное производство», 1971, № 11, с. 1—3.
20. Простяков А. А. Индукционные и нагревательные устройства. М., «Энергия», 1970, 117 с.
21. Получение синтетических чугунов из стружки.— «Литейное производство», 1966, № 8, с. 8. Авт.: Д. П. Иванов, И. К. Кульбовский, Ю. И. Волков.
22. Роббит А. Д. Практика электроплавки. М., Metallurgizdat 1960. 220 с.
23. Самсонов Г. В., Кислый П. В. Высокотемпературные неметаллические термодары и паконечники. Киев, «Наукова думка», 1965, 182 с.
24. Свенчанский А. Д., Гуттерман К. Д. Автоматическое регулирование электрических печей. М.—Л., «Энергия», 1965, 480 с.
25. Свенчанский А. Д., Трейзон Э. Л. Автоматизация электрических установок. М., «Энергия», 1968, 264 с.
26. Стойкость тигля 12-тонной индукционной печи.— «Литейное производство», 1970, № 4, с. 33—36. Авт.: М. Н. Кайбишева, Б. П. Платонов, Ю. Б. Платонов и др.
27. Тарасов В. И. Канальные индукционные печи для выдержки и перегрева чугуна фирмы ASEA.— «Литейное производство», 1972, № 5, с. 8—11.
28. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник, т. II. М., изд-во АН СССР, 1962, 916 с.
29. Трофимов М. Г. Футеровка индукционных печей. М., «Металлургия», 1968, 288 с.
30. Условия плавки как фактор, определяющий структуру и свойства чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом.— В кн.: Прогрессивная технология литейного производства. Горький, Волго-Вятское изд-во, 1969, с. 142—147. Авт.: Н. Г. Гиршович, А. Я. Иоффе, В. С. Голицын и др.
31. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1967, 496 с.
32. Факторы стойкости футеровки индукционных тигельных печей при плавке чугуна.— «Литейное производство», 1972, № 4, с. 1—4. Авт.: А. С. Заверткин, Н. В. Архипов, А. И. Августинин и др.
33. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959, 456 с.
34. Явойский В. И. Теория процессов производства стали. М., Metallurgizdat, 1963, 792 с.
35. Barrans O. M., Foster B. D. Advances incement Technology for induction furnace linings.— «Mod. Cast», 1965, v. 48, p. 2.
36. Berens L., Feldhus H. Der Einfluss von Schmelzgut und Schlacke auf die Haltbarkeit der feuerfesten Auskleidung des Inductionsofen für Eisen und Stahlschmelzung.— «Giesserei», 1966, N 2, s. 30—38.
37. Halm L. Le probleme des refractaires dans les fours electriques.— «Metallurgie et constr. mec.», 1968, N 3, p. 175—177.
38. Hautmann M. Betriebsergebnisse mit einer Induktions offen gross anlage (Flüssigverbund) für Giesseisen.— «Giesserei», 1968, 55, s. 456—460.
39. Kistermann K. Fekipol-metod. — «Giesserei — Praxis», 1968, N 11, s. 182—186.
40. Renkey A. L. Refractory regnerements for large induction furnaces in the ferrous foundry. — «Refractories», 1967, v. 43, p. 158—163.
41. Thyberg B., Grönhult O. Der Einfluss des Wormhaltens in Inductions öfen auf die Metallurgischen und mechanischen Eigenschaften von granen Giesseerei.— «Giesserei — Praxis», 1971, N 6, s. 15.
42. Zingg E. Das elektrische Schmelzen in der Giesserei. Vorträge. 27.I. G. K., Zürich, 1960, s. 75.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Конструкции индукционных печей для плавки чугуна . . .	8
Глава II. Футеровка индукционных печей для плавки чугуна . .	36
Глава III. Металлургические процессы и плавка в индукционных печах	63
Глава IV. Качество чугуна индукционной плавки	94
Глава V. Энергетический (тепловой) и материальный балансы индукционных печей	104
Глава VI. Особенности эксплуатации и вспомогательное оборудование чугуноплавильных индукционных печей	143
Глава VII. Техничко-экономические особенности плавки чугуна в индукционных печах	165
Список литературы	174

Борис Павлович **Платонов**, Анатолий Дмитриевич **Акименко**,
 Сания Максимовна **Богуцкая**, Евгений Митрофанович **Китаев**,
 Юрий Борисович **Платонов**, Алексей Анатольевич **Скворцов**

«ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ ЧУГУНА»

Редактор издательства *Г. Н. Соболева*, Технический редактор *Т. И. Андреева*
 Корректор *И. М. Борейша* Обложка художника *Л. С. Вендрова*

Сдано в набор 7/IV 1976 г. Подписано к печати 27/VIII 1976 г. Т-16416
 Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1
 Усл. печ. л. 11,0. Уч.-изд. л. 12,0.
 Тираж 6 500 экз. Заказ № 316. Цена 65 коп.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3
 Тульская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете Совета
 Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
 г. Тула, проспект им. В. И. Ленина, 109.

