

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЛИТЬЯ

В. С. ШУМИХИН, П. П. ЛУЗАН, М. В. ЖЕЛЬНИС

СИНТЕТИЧЕСКИЙ ЧУГУН

ИЗДАТЕЛЬСТВО „НАУКОВА ДУМКА“ КИЕВ — 1971

В книге освещены основные вопросы выплавки синтетического чугуна из вторичных металлов в индукционных электропечах промышленной частоты. Изложены методы повышения эффективности работы плавильных установок, долговечности футеровки индукционных печей, рассмотрены металлургические процессы плавки. Приведены экспериментальные и расчетные характеристики процессов производства и свойств сплавов.

Предназначена для научных и инженерно-технических работников, занятых в области металлургии и литейного производства.

Рецензенты:

канд. техн. наук В. В. Клибус,
канд. техн. наук В. А. Шурхал

Редакция технической литературы
Зав. редакцией В. Д. Навроцкая

Развитие современной техники требует постоянного улучшения физико-механических и специальных свойств конструкционных материалов, синтеза новых сплавов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками. Наиболее широко в промышленности используется чугун, доля отливок из которого в общем потреблении металла в СССР составляет 23%. Подавляющая часть отливок (около 70%) производится в машиностроении, где широко используются ценные конструкционные и эксплуатационные свойства чугуна — уникальная циклическая вязкость, высокая износостойкость, прочность чугунов высококачественных марок, сопоставимая с прочностью сталей, хорошая обрабатываемость. Такие технологические свойства чугуна, как высокая жидкотекучесть, ограниченные температуры расплава, малая усадка, обеспечивают благоприятные условия для эффективного применения его в производстве деталей машин, независимо от сложности, размеров и веса этих деталей. В то же время основной объем выплавляемого в СССР конструкционного литого чугуна характеризуется низкими показателями, что в значительной мере обусловлено несовершенством плавильного оборудования, плохим качеством доменных чушковых чугунов и литейного кокса. При этом наблюдается тенденция к дальнейшему ухудшению рабочих характеристик исходных шихтовых материалов. Прочностные показатели серых чугунов обычных марок во многих случаях не удовлетворяют условиям работы деталей машин, качество которых в общей массе остается ниже уровня мировых стандартов. Замена чугунных деталей стальными, как правило, неэкономична и сопровождается потерей ценных технологических свойств чугуна. В настоящее время удельный вес низкомарочного чугуна в общем выпуске отливок исключительно высок

и составляет около 60%, а выпуск отливок из высококачественного чугуна (с шаровидным графитом, ковкого, легированного и т. д.) — менее 10% общего объема.

Организация выплавки синтетических чугунов является радикальным средством подъема чугунолитейного производства на качественно новую ступень, так как синтетический чугун можно отнести к конструкционным материалам, существенно отличающимся от применяемых ваграночных чугунов не только прочностными свойствами, но природой и технологией получения. Сущность процесса плавки синтетического чугуна состоит в металлургическом обогащении жидкого железа углеродом и кремнием в произвольных пропорциях, а также в применении высокотемпературной обработки, что позволяет получать сплавы с заранее заданными химическим составом и свойствами. Для формирования высоких свойств чугуна в отливках необходимо разрушение несовершенной структуры исходных шихтовых материалов. Применение для выплавки синтетического чугуна индукционных печей позволяет осуществлять глубокую термовременную обработку, рафинирование, модифицирование и легирование жидкого металла. Индукционные печи обладают высокой технологической гибкостью, т. е. позволяют получать чугун любого химического состава, выпускать жидкий металл произвольными порциями, длительно хранить металл без изменения его свойств, использовать шихтовые материалы малого объемного веса, механизировать и автоматизировать процессы выплавки.

Исходным сырьем для получения синтетического чугуна служат стальной лом, листовая обрезь, стружка и другие дешевые низкосортные металлоотходы. В настоящее время коэффициент использования металла в машиностроении составляет 0,7, т. е. 30% металла идет в отходы, большая часть которых имеет малый объемный вес, что затрудняет их дальнейшую переработку. Проблема эффективного использования металлоотходов малого объемного веса наиболее рационально решается при организации выплавки синтетического чугуна. Достоинством такой выплавки является возможность переплавки отходов непосредственно на месте их образования — в литейных цехах машиностроительных заводов без длительной транспортировки и безвозвратных потерь металла. Доменные чушковые чугуны вообще исключаются из

состава шихты, что высвобождает соответствующие мощности металлургического производства. Использование дешевых металлоотходов для выплавки синтетического чугуна обеспечивает снижение его себестоимости на 25—30% по сравнению с обычными чугунами вторичного переплава.

Синтетические сплавы наиболее целесообразно использовать для производства высококачественных чугунов, особенно с шаровидным графитом, учитывая низкое содержание в них демотилифицирующих примесей. Из синтетического чугуна изготовляют разнообразные отливки ответственного назначения: фрикционы, коленчатые валы, блоки цилиндров и головки двигателей внутреннего сгорания, арматуру для работы при высоких давлениях и повышенных температурах, износостойкие отливки, станочное литье и т. д.

Обобщение и публикация этого, главным образом, фактического материала должны способствовать совершенствованию литейного производства и дальнейшему прогрессу народного хозяйства страны.

ПЛАВИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

1. ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ

В индукционных тигельных печах энергия от индуктора к металлу передается электромагнитным потоком, наводящим в металлической шихте вихревые токи, которые разогревают шихтовые материалы. Осуществляется неоднократное преобразование энергии: электрической — в электромагнитную, электромагнитной — в электрическую, электрической — в тепловую. В принципе индукционную тигельную печь можно рассматривать как трансформатор энергии, у которого первичной обмоткой является водоохлаждаемый индуктор, а вторичной — металлическая шихта или расплав, помещенные внутри индуктора. Энергия, превращенная в тепло в садке [7],

$$W = I^2 n^2 2\pi^2 \frac{d}{h} \sqrt{\rho \mu f \cdot 10^{-9}} \text{ [вт]}, \quad (1)$$

где I — сила тока в индукторе, a ; n — число витков индуктора; d — средний диаметр тигля, $см$; ρ — удельное сопротивление металла, $ом \cdot см$; h — высота металла в тигле, $см$; μ — магнитная проницаемость металла, $гн/м$; f — частота тока, $гц$.

Произведение In обычно называют ампер-витками. Таким образом, количество тепла, генерируемое в садке, пропорционально квадрату ампер-витков и корню квадратному из удельного сопротивления и частоты. Магнитная проницаемость сплавов на железной основе выше точки Кюри равна единице.

Поскольку тепло генерируется непосредственно в металлической шихте, то в теплотехническом отношении индукционные электропечи являются современным плавильным агрегатом с высокой скоростью плавления. Питание индуктора печей обычно осуществляется переменным током частотой 50—10 000 $гц$, причем скорость на-

грева металла тем выше, чем больше частота тока. Соответственно этому уменьшается длительность плавки (рис. 1). Разогрев металла происходит в сравнительно тонком поверхностном слое, где наведенные токи достигают значительной величины. Глубина проникновения ε магнитного поля в металл определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \text{ [см]}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что значение ε понижается с увеличением частоты тока. Следовательно, для повышения теплопередачи с увеличением диаметра тигля индукционной печи необходимо увеличить глубину проникновения магнитного поля, что практически осуществляется уменьшением частоты. Для стали и чугуна в жидком состоянии глубина проникновения магнитного поля при частоте 500 $гц$ составляет 2—3 $см$, а при частоте 50 $гц$ уже 7—8 $см$.

В результате действия электромагнитных сил и теплового градиента в ванне расплава возбуждаются вынужденные потоки жидкого металла турбулентного характера, тем более мощные, чем больше глубина проникновения магнитного поля.

Интенсивность электромагнитного перемешивания Π жидкого металла в тигле печи при фиксированной частоте зависит главным образом от удельной подключенной мощности [69]:

$$\Pi = \frac{31,6 N_{инд}}{4 \sqrt{\rho f V \gamma}} \cdot \frac{d}{l} 100 \approx k N_i [\%], \quad (3)$$

где $N_{инд}$ — индуцированная мощность, $квт$; N_i — удельная мощность печи, $квт/т$; V — объем жидкого металла, $см^3$; γ — удельный вес жидкого металла, $т/м^3$; d — диаметр тигля, $см$; l — высота тигля в индукторе, $см$; k — коэффициент пересчета, для промышленных установок $k = (2 \div 6) \cdot 10^{-2} [т/квт]$.

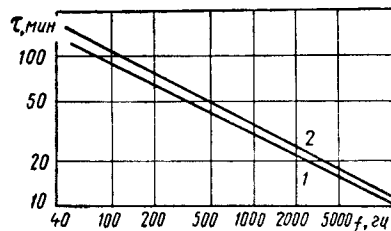


Рис. 1. Минимальная длительность плавки стали и серого чугуна (1), а также алюминия и меди (2) в индукционных печах различной частоты [4].

С повышением удельной мощности печи или уменьшением степени заполнения тигля увеличивается интенсивность перемешивания жидкого металла. Скорость движения жидкого металла в тигле печи при частоте 50 гц

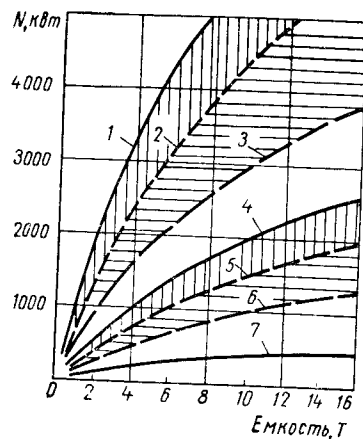


Рис. 2. Зависимость потребляемой электроэнергии, емкости и интенсивности перемешивания металла в индукционных электропечах от частоты тока [87]:

1, 2, 3 — соответственно максимальная мощность, области сильного и среднего перемешивания при частоте 600 гц; 4, 5, 6, 7 — соответственно максимальная мощность, области сильного и среднего перемешивания, а также изотермическая выдержка при частоте 50 гц.

стали (ИСТ) по данным Всесоюзного научно-исследовательского института электротермического оборудования представлены в табл. 1.

Печи промышленной частоты не требуют преобразователей и просты по устройству. Электрический коэффициент полезного действия их при плавке чугуна может достигать 75%. Эти печи впервые были применены в 1943—1944 гг. для плавки магния. В 1950 г. сконструированы печи для плавки алюминия. Высокое качество металла и экономичность плавки способствовали внедрению печей промышленной частоты в литейных цехах для выплавки чугуна и стали. Капитальные затраты при уста-

в 1,7 раза больше, чем при частоте 150 гц, и в 4,4 раза больше, чем при частоте 1000 гц. В связи с интенсивным перемешиванием металла величина подводимой к печи удельной мощности уменьшается с понижением частоты (рис. 2). Соответственно этому понижается и скорость нагрева металла. Необходимый уровень производительности печей низкой частоты достигается повышением их емкости.

По значению частоты тока индукционные плавильные печи подразделяются на печи промышленной (50—60 гц), утренной (150—180 гц), средней (500—600 гц) и высокой (500—10 000 гц) частот. Типы индукционных тигельных печей для плавки чугуна (ИЧТ) и

Таблица 1

Емкость печи, т	Высокочастотные печи (500—3000 гц)			Печи промышленной частоты (50 гц)		
	Тип	Мощность, кВт	Производительность, т/ч	Тип	Мощность, кВт	Производительность, т/ч
0,06	ИСТ-0,06	50	0,06	—	—	—
0,10	ИСТ-0,06	50	0,06	—	—	—
0,16	ИСТ-0,16	100	0,12	—	—	—
0,25	ИСТ-0,16	100	0,12	—	—	—
0,40	ИСТ-0,4	250	0,33	—	—	—
0,60	ИСТ-0,4	250	0,33	—	—	—
1,00	ИСТ-1	500	0,75	—	—	—
1,60	ИСТ-1	500	0,75	ИЧТ-1	360	0,5
2,50	ИСТ-2,5	1500	2,25	—	—	—
4,00	ИСТ-2,5	1500	2,25	ИЧТ-2,5	1300	1,23
6,00	ИСТ-6	2500	3,48	ИЧТ-6	1300	2,26
10,00	ИСТ-10	3000	4,50	ИЧТ-10	1700	3,0
16,00	ИСТ-16	5000	7,45	ИЧТ-16	2500	4,5
25,00	ИСТ-25	6000	9,70	ИЧТ-25	3500	6,3
40,00	—	—	—	ИЧТ-40	—	—
60,00	—	—	—	ИЧТ-60	—	—
100,00	—	—	—	ИЧТ-100	—	—

новке этих печей по сравнению с другими типами индукционных агрегатов самые низкие. Один из основных недостатков печей промышленной частоты — малая скорость плавления при холодной шихте (50—60% скорости на жидкой загрузке). Чтобы увеличить скорость плавления, в печи обычно оставляют часть жидкого металла предыдущей плавки — так называемое «болото». Продолжительность плавки при этом составляет 2—3 ч, расход электроэнергии 600—800 кВт·ч/т. В больших печах (емкостью 30—40 т) расход электроэнергии значительно меньший. Есть также сведения о применении в американской промышленности тигельных печей емкостью 50 т и потребляемой мощностью 6500 кВт. Проектируются печи емкостью 150 т. Естественно, что такие мощные агрегаты полностью механизуются и автоматизируются и представляют собой крупные инженерные сооружения [70]. В настоящее время печи промышленной частоты широко применяются, особенно для производства синтетических

и специальных чугунов, в том числе чугунов с шаровидным графитом.

В индукционных тигельных печах из-за отсутствия замкнутого магнитопровода и потерь энергии в зазоре между индуктором и металлом величина потока рассеяния велика, а полезного магнитного потока мала, реактивная мощность в несколько раз больше активной и $\cos \varphi$ зна-

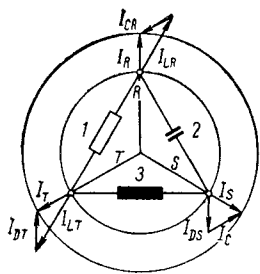


Рис. 3. Векторная диаграмма токов индукционной тигельной печи промышленной частоты с компенсирующим и симметрирующим устройствами:
1 — индуктор; 2 — конденсаторная батарея;
3 — дроссель.

чительно меньше единицы. Чтобы не увеличивать мощность питающего печь генератора, для компенсации реактивной мощности параллельно индуктору подключают батарею конденсаторов.

Электрическая схема печей исключительно проста при использовании однофазной нагрузки и сильно усложняется в случае применения уравновешенной трехфазной нагрузки. Для равномерного распределения нагрузки по фазам при подключении индуктора в трехфазную сеть в схему печи вводят симметрирующее устройство (рис. 3) [89]. Индуктор печи подключен к фазам R и T . Для выравнивания тока свободной фазы S в фазы $R-S$ включается емкостная, а в фазы

$S-T$ —индуктивная нагрузка. При этом векторы основного тока I_{LR} и конденсаторного I_{CS} суммируются в фазовый ток I_R , а векторы основного тока I_{LT} и тока дроссельной катушки I_{DT} суммируются в фазовый ток I_T . Если $I_{CS} = I_{DT}$ и их значения составляют 58% основного тока, то величины токов всех трех фаз будут одинаковыми и, следовательно, будет иметь место одинаковое фазовое состояние. Фазовый ток I_S будет являться векторной суммой токов I_{CS} и I_{DS} , если только при этом $\cos \varphi = 1$, т. е. если однофазная печная нагрузка будет чисто омической.

Поскольку величина печного тока изменяется во время плавки, то соответственно следует изменять значение тока в конденсаторной батарее и дроссельной катушке, что собственно и означает симметрирование трех фаз. В настоящее время имеется ряд устройств для автоматичес-

кого симметрирования и стабилизации cosφ индукционных тигельных печей промышленной частоты.

В связи с наличием большой конденсаторной батареи суммарная площадь для индукционных печей промышленной частоты несколько больше, чем для печей средней частоты. Однако коэффициент полезного действия печей промышленной частоты почти в три раза выше, чем у вагранок, и на 10% выше, чем у печей средней частоты.

Конструктивно печи промышленной частоты в соответствии с требованиями производства могут быть выполнены с двухносковым тиглем, качающиеся, с горизонтальной загрузкой и т. д. Применение печей промышленной частоты обуславливается принципиальными достоинствами и недостатками индукционной плавки, а также экономическими соображениями. Эти печи рекомендуются для непрерывной плавки чугуна при емкости свыше 1,5 т, при большой емкости и малой удельной мощности, а также в качестве раздаточных при duplex-процессе.

Имеются примеры успешной работы плавильных установок с печами промышленной частоты очень высокой производительности — 40 т/ч жидкого металла и более [77].

Печи утроенной частоты стали применять после разработки простых и экономичных преобразователей частоты. Они выгодно отличаются от печей промышленной частоты повышенной удельной мощностью и производительностью. Однако перемешивание металла в них менее интенсивное. Используются эти печи чаще для плавки и перегрева специальных чугунов на качественной шихте с обеспечением точного химического состава.

Печи средней частоты рационально применять, когда емкость меньше 1,5 т, когда работа при большей емкости сопряжена с частыми остановками и пусками на холодной завалке, всегда при большой удельной мощности. Во многих случаях предпочтительнее использовать печи средней частоты. Однако при выплавке синтетического чугуна, где необходима интенсификация перемешивания жидкого металла, целесообразно применять печи промышленной частоты. Возможно и совмещение тех и других печей в одной плавильной установке. Так, в работе [95] описывается плавильная установка производительностью 6 т/ч жидкого чугуна. Она состоит из трех тигельных печей средней частоты, двух умформеров мощностью по

2500 кВт, вырабатывающих ток с частотой 500 гц, и двух печей промышленной частоты мощностью по 800 кВт. Две печи средней частоты предназначены для плавки чугуна, две печи промышленной частоты — для доводки, выдержки и раздачи металла по ковшам, одна печь — резервная. Электрическая схема обеспечивает полную взаимозаменяемость печей. Емкость каждой печи равна 4 т, допускаемая перегрузка — до 5 т. Общий расход электроэнергии составляет 810 кВт·ч/т. Средний расход энергии только на плавку и перегрев металла без потерь на холостой ход умформера равен 710 кВт·ч/т, средний расход энергии на выдержку металла — 68 кВт·ч/т. Данные энергетического баланса показывают, что при плавке в среднечастотной печи полезно используется около 50% энергии, 20% теряется с охлаждающей водой и 13% расходуется на холостой ход умформера.

Канальные индукционные печи промышленной частоты имеют исключительно высокий коэффициент полезного действия (90—95%) и меньшую потребность в конденсаторных батареях по сравнению с тигельными печами. В таких печах каналы могут быть горизонтальными, вертикальными, наклонными, качающимися. Печи с каналом, расширяющимся с одной стороны кверху, обеспечивают течение металла в одном направлении, что способствует интенсивному массообмену и повышению к. п. д. до 98%. Удельная мощность канальных печей обычно небольшая (порядка 200 кВт/т). Расход электроэнергии при плавке чугуна составляет 500—600 кВт·ч/т; а для поддержания температуры чугуна в пределах 1400°С—12—20 кВт·ч/т. Емкость печей достигает 250 т. Пуск канальных печей и изменение состава чугуна затруднены, так как в печи всегда должно находиться некоторое количество расплавленного металла. Недостатком этих печей является низкая стойкость футеровки каналов. Кроме того, за износом футеровки канала нельзя наблюдать непосредственно.

Глиноземистая футеровка ведет себя удовлетворительно в узком (1500—1550°С) интервале температур. При надлежащем контроле в этом интервале температур она может служить более полугода. Таким образом, канальные печи наиболее целесообразно использовать в качестве миксеров, раздаточных устройств и при дуплекс-процессе с вагранками различного типа или дуговыми печами, хотя иногда их применяют в качестве плавильного

агрегата. Во многих случаях дуплекс-процесс является наиболее экономичным методом получения качественного металла. Сравнение средних эксплуатационных показателей индукционных канальных и тигельных печей промышленной частоты с показателями печей средней частоты приведено в табл. 2 [71]. Характеристики печей средней частоты приняты за 100%, к. п. д. — 55%, емкость — свыше 50 кг.

Таблица 2

Показатели	Индукционная печь промышленной частоты	
	тигельная	канальная
Занимаемая площадь, м ²	75	30
К. п. д., %	65	86
Стоимость установок	70	25
Потребление электроэнергии, %	82	44
Уход и текущий ремонт, %	80	80
Амортизационные отчисления, %	65	22
Емкость, кг	Свыше 600	Свыше 100
Стойкость футеровки, %	100	100
Возможность перехода с одного сплава на другой, %	100	50
Стоимость резервной печи, %	130	100
Опасность неполадок, %	70	30

Дуплекс-процесс с использованием индукционных печей в качестве вторичных агрегатов широко применяется в литейных цехах с массовым и мелкосерийным характером производства отливок из чугуна различных марок. Для перегрева и доведения до заданного химического состава чугуна одинаково успешно употребляют канальные и тигельные индукционные печи промышленной частоты различной емкости. Канальные печи обычно имеют емкость не менее часовой производительности вагранки, тигельные печи — не менее 30% часовой производительности вагранки. Легирование, модифицирование или рафинирование жидкого металла можно осуществить непосредственно в индукционных печах. Поскольку при использовании индукционных печей в дуплекс-процессе отмечается улучшение качества металла и уменьшение брака даже без специальной обработки, этот процесс широко применяют в массовом производстве.

2. РАБОТА ПЛАВИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Основную долю затрат, расходуемых на плавление и перегрев металла в индукционных тигельных печах промышленной частоты, составляют затраты на электроэнергию, амортизацию и заработную плату. Остальными видами затрат можно пренебречь. Расход и стоимость электроэнергии не являются постоянными величинами.

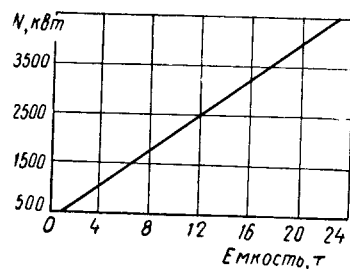


Рис. 4. Зависимость оптимальной мощности, необходимой для выплавки чугуна в индукционной тигельной печи промышленной частоты, от емкости печи [79].

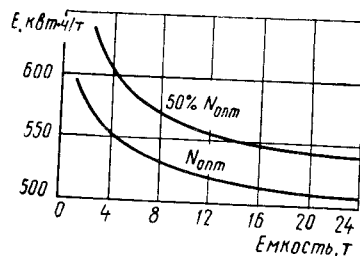


Рис. 5. Зависимость теоретического расхода электроэнергии на плавку и перегрев чугуна до $1400^{\circ}C$ в печах промышленной частоты от емкости печи [79].

Тигельные печи промышленной частоты имеют определенную мощность. Верхняя граница мощности печи оценивается интенсивностью установившегося движения металла в ванне. Увеличение мощности печи сопровождается возрастанием интенсивности движения металла, что способствует его перемешиванию и приводит к заметному дополнительному износу футеровки печи и другим нежелательным явлениям. Поэтому введено понятие оптимальной мощности печи (рис. 4) [79].

Для плавки и перегрева металла в печи с оптимальной мощностью расход электроэнергии определяется энтальпией металла и величиной электрических и тепловых потерь. При уменьшении мощности возрастает удельный расход энергии (рис. 5), так как время плавки и потери тепла увеличиваются. При уменьшении мощности вдвое расход электроэнергии увеличивается примерно на 10%. Следовательно, основные факторы, обуславливающие расход электроэнергии при плавке в индукционных ти-

гельных печах промышленной частоты, — емкость и мощность печи. Поэтому для конкретной программы плавки следует выбирать такую печь, которая работала бы непрерывно с оптимальной мощностью. Такую мощность индукционная тигельная печь промышленной частоты развивает только при наличии в ней определенного количества жидкого металла.

В основу зависимости мощности, потребной для поддержания теплоты плавки при различном коэффициенте заполнения печи, положено то обстоятельство, что индукционные тигельные печи работают при постоянном напряжении тока (рис. 6). Поэтому индуцированная мощность составляет лишь около 45% той мощности, которая соответствует 100%-ному заполнению.

При уменьшении степени заполнения печи ниже критической снижается ее производительность и увеличивается расход энергии, поскольку время плавки увеличивается и ухудшается электрический к. п. д. печи. Для сокращения расхода электроэнергии процесс плавки следует организовать так, чтобы в начале каждого цикла печь была заполнена жидким металлом не менее чем на 1/3 ее емкости. Если по условиям производства это невозможно, то для начала плавки следует подбирать такую шихту, которая поднимала бы зеркало оставшегося металла как можно выше. В случае запуска холодной печи без «болота» после длительной остановки необходимо потратить дополнительную энергию на прогрев футеровки печи. Следует учитывать, что процесс прогрева футеровки печи заканчивается через три-четыре плавки, а теплопередача через стенки в этом случае меньше, чем при установившемся режиме. Дополнительный расход энергии тем меньше, чем реже производится запуск холодной печи. При трехсменном режиме работы влияние одного (в неделю) запуска холодной печи на средний расход энергии почти незаметно. При частых остановах крупных печей разогревать футеровку целесооб-

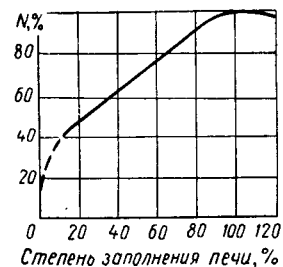


Рис. 6. Зависимость индуцированной мощности от степени заполнения тигля печи (отношения высоты ванны металла к высоте индуктора) [79].

разно с помощью газовых или жидкостных горелок, поскольку затраты энергии при этом могут быть снижены на 40%.

Общий расход электроэнергии при работе печи определяется не только энергией, необходимой для плавления и перегрева металла. Моторы вспомогательных агрегатов (насосных станций для охлаждения воды, вентиляторов, насосных станций гидросистем и т. д.) потребляют от 1 до 3% расхода электроэнергии на плавление и перегрев металла.

Процессы плавления и перегрева металла занимают не все время работы индукционной тигельной печи. В течение некоторого времени в печи поддерживается заданная температура жидкого металла. Это время необходимо для отбора жидкого металла, слива шлака, измерения температуры, корректировки химического состава и т. д.

Значительная доля потерь тепла в режиме изотермической выдержки обусловлена излучением зеркала металла. Поэтому слой шлака на зеркале металла уменьшает расход энергии на поддержание температуры жидкого чугуна. Поскольку потери тепла излучением пропорциональны четвертой степени абсолютной температуры, то для повышения экономичности работы индукционной тигельной печи промышленной частоты нужно процесс плавки вести при возможно низкой температуре и доводить металл до заданной температуры непосредственно перед разливкой; своевременно догружать печь по ходу плавления металла, чтобы излучаемое зеркалом жидкого металла тепло использовалось для подсушки и подогрева шихты; при длительной выдержке жидкого металла в печи покрывать его зеркало шлаком (например, кварцевым песком); снижать температуру и закрывать печь крышкой. Потери тепла излучением с помощью крышки печи можно уменьшить только при доводке и выдержке металла, так как в период плавления при проведении технологических операций крышку нужно держать открытой.

Общая мощность, необходимая для поддержания температуры жидкого чугуна и работы вспомогательных агрегатов печи, составляет около 10% ее оптимальной мощности.

Вспомогательное время приводит не только к увеличению расхода электроэнергии, но и к снижению произ-

водительности печи. Вспомогательное время, обусловленное работами при отборе одной порции металла, равно 5—6 мин. Чем чаще происходит разливка металла, тем меньше производительность печи. Для плавильного отделения с ритмичным отбором жидкого металла существует некоторое минимальное количество печей, которое позволяет выполнить заданную программу. С увеличением производительности отделения при малом весе отбираемой порции жидкого металла число потребных печей увеличивается очень быстро. Если необходимо, чтобы плавильное отделение не зависело от ритма работы формовочного отделения цеха, нужно установить дополнительную раздаточную печь, в качестве которой целесообразно использовать печь того же типа, что и плавильные. Тогда печи в режиме раздачи металла будут работать поочередно.

Большое внимание уделяется созданию установок, обеспечивающих необходимую часовую производительность печи при наименьшем потреблении электроэнергии. Практика эксплуатации индукционных печей промышленной частоты показывает, что для выполнения условия минимального потребления электроэнергии емкость печей должна определенным образом соответствовать часовой производительности жидкого металла. Если емкость печей равна 1—5 т жидкого металла, подключаемая мощность сильно возрастает при увеличении часовой производительности (рис. 7 [4]). Для расхода чугуна 200 кг/ч наиболее экономичными являются печи емкостью 1—2 т, для 1000 кг/ч — емкостью 4—5 т, для 2000 кг/ч — 10 т и выше.

Выбор экономичной плавильной установки, состоящей из нескольких печей, — сложная задача. Для часовой потребности в жидком металле 200, 1000 и 2000 кг определены, например, три варианта плавильной установки. Установка из трех печей емкостью 1,6 т каждая будет экономичнее других при расходе жидкого чугуна менее 1 т/ч; установка из двух печей емкостью по 2,25 т будет

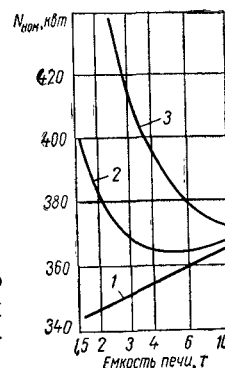


Рис. 7. Зависимость величины мощности печей от емкости и часовой производительности: 0,2 (1), 1,0 (2), 2,0 3 т/ч.

экономичнее других при расходе металла более 1 т/ч. Плавильная установка, состоящая из одной печи емкостью 4 т, не экономична.

Изменение температуры расплава в индукционных печах зависит от удельной мощности установки, удельных потерь тепла в окружающую среду, загрузки шихтовых

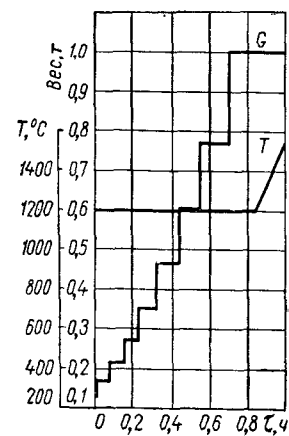


Рис. 8. Диаграмма рациональной загрузки шихтовых материалов при плавке чугуна в индукционных печах [4].

материалов, а также поглощения или выделения тепла при протекании металлургических процессов. Поскольку доля стоимости электроэнергии в общей сумме затрат на плавку относительно велика, непредусмотренные перегрев или выдержка чугуна в печи вызывают дополнительное удорожание выплавляемого металла. Помимо тщательного контроля температуры расплава необходимо проводить мероприятия, способствующие осуществлению равномерного температурного режима плавильной печи и периодического отбора металла. Рациональный режим изотермической плавки можно обеспечить соответствующей загрузкой шихтовых материалов. Вес порции добавляемой шихты должен быть согласован с общим весом расплавленного металла и его температурой. Если при этом добавляется какая-либо присадка (науглероживатель, ферросилиций и т. п.), то необходимо учитывать тепловой эффект ее растворения. Можно, не допуская затвердевания расплава, дополнительно использовать часть теплоты плавления металла. При такой изотермической плавке шихту следует загружать возможно чаще мелкими порциями. Высокая степень использования емкости печи при непрерывной ее загрузке повышает фактическую мощность плавильной установки. Из диаграммы технологически целесообразной последовательности загрузки шихты в печь при плавке чугуна (рис. 8) видно, что величина порции шихты G может быть скорректирована по времени плавки, если не изменяется подведенная к печи мощность.

В период разливки металла из печи в ванну металла обычно подается такая же по весу порция шихты и расплавляется, после чего важно быстро поднять температуру расплава до прежней температуры выпуска. Подобным образом при термовременной обработке необходимо захлаживать ванну металла чистым скрапом во избежание сильного износа футеровки. Возможность осуществления процесса с непрерывной периодической выдачей жидкого металла при термовременной обработке жидкого синтетического чугуна исследовалась в лабораторных условиях на печи емкостью 100 кг. За один выпуск сливали 1/5 часть чугуна (20 кг), после чего загружали 11 кг стали, ферросплавы и науглероживатель в расчете на 20 кг чугуна; перегревали чугун до температуры 1550° С. Для захлаживания загружали 9 кг стали, после чего температура расплава снижалась до 1400° С. В течение 1,5 ч было произведено подряд более 10 выпусков металла [78].

Следует отметить, что в современных мощных индукционных печах промышленной частоты, применяемых для выплавки синтетического чугуна, необходимо осуществлять жесткий контроль температуры металла, так как она повышается очень быстро, что влияет не только на экономичность работы установки, но и на качество металла. Поэтому большое внимание уделяется организации производства, обеспечивающей требуемые ритмичность и температурный режим работы плавильных печей. Производственно-технические мероприятия позволяют повысить производительность плавильного участка и экономичность его работы. Однако и при безукоризненно организованном технологическом процессе доля расходов на электроэнергию в себестоимости получаемого жидкого металла остается значительной и может составлять в определенных случаях до 30%.

С целью снижения общей суммы расходов и компенсации увеличения затрат на энергию при электроплавке стремятся использовать дешевую, низкосортную шихту, так как доля металлозавалки в себестоимости чугуна является основной (до 70%). Таким образом удается существенно уменьшить себестоимость жидкого металла и сделать электроплавку экономичнее обычного переплава. В работе [98] приводятся цифры сравнительной стоимости тонны жидкого чугуна при выплав-

ке в вагранках с холодным (119%) и горячим (111%) дутьем, при работе их в паре с индукционной печью (118 и 114% соответственно) и для плавки в тигельной печи промышленной частоты (100%). В течение нагрева и плавления шихты при индукционной и ваграночной плавках полезно расходуемая энергия составляет около 60%, в электродуговой печи — 75%, при перегреве чугуна в вагранке — 7%, в индукционной печи промышленной частоты — 65% и в электродуговой печи — 25%. Очевидно, что применение дуплекс-процесса с максимальным использованием подводимой энергии может оказаться целесообразным в массовом производстве с учетом используемых шихтовых материалов и обеспечения необходимого качества жидкого чугуна.

Естественно, что по сравнению с ваграночным процессом индукционная плавка чугуна будет наиболее экономична при выплавке высококачественного металла, а также модифицированных и легированных сплавов. В среднем себестоимость синтетического чугуна индукционной плавки на 30—40% меньше себестоимости такого же чугуна вторичного ваграночного переплава [41—44, 65].

3. ПОДГОТОВКА ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Из анализа работы индукционных печей видно, что на режиме подогрева шихты до температуры плавления печи работают неэффективно. Изменение значения термического коэффициента полезного действия индукционной печи в течение всего периода плавки характеризуется резким увеличением значений при расплавлении металла. С целью повышения производительности печи и экономичности работы необходимо сокращать период разогрева шихты, что достигается путем предварительного подогрева шихты вне плавильной печи. Чем выше содержание подогретой шихты в общей металлозавалке и температура подогрева, тем выше термический к. п. д. плавильного агрегата.

Теоретически при предварительном подогреве всей шихты до 700°С производительность плавильной печи должна увеличиться на 50% по сравнению с холодной завалкой. Однако с учетом коэффициента полезного использования электроэнергии (в среднем 0,75) действи-

тельно возможный рост производительности плавильной индукционной печи будет ниже. Скорость плавки определяется развиваемой тепловой мощностью печи; если часть тепла уже передана шихтовым материалам при предварительном подогреве, то при неизменной мощности индукционной печи скорость плавки возрастает (рис. 9).

Чем ниже температура выпуска жидкого металла, тем выше скорость плавки. Повышение производительности плавильных индукционных печей при том же выпуске цеха обуславливает уменьшение потребности в этих печах. При этом, естественно, снижаются капитальные вложения и эксплуатационные затраты, что полностью окупает затраты на подогрев шихты и приводит к уменьшению себестоимости выплавляемого металла. Одновременно решается проблема очистки загрязненной шихты, так как стружка, различные металлоотходы загрязнены маслами, эмульсией и другими примесями. В 1 т чугунной стружки может содержаться более 30 кг масла и эмульсии. Влага, летучие материалы, цветные металлы при высокой температуре предварительного подогрева полностью удаляются из шихты, в связи с чем улучшается качество металла и удлиняется срок службы футеровки. Практика предварительного подогрева шихты полностью подтверждает целесообразность применения этого метода, особенно при выплавке синтетического чугуна из стружки, мелких отходов и других низкокачественных материалов, а также отмечает повышение производительности плавильных печей не менее чем на 25% [94].

Для предварительного подогрева шихты можно использовать индукционные печи специальной конструкции, размещенные непосредственно возле тигельной печи. Такая организация производства пригодна при эксплуатации плавильных печей емкостью до 10 т. Для печей средней емкости (10—20 т) целесообразна установка одного

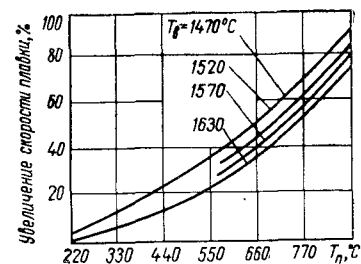


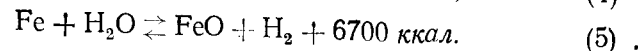
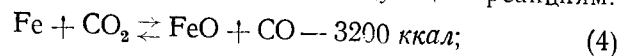
Рис. 9. Зависимость увеличения скорости плавки от подогрева шихты (T_n) и температуры выпуска жидкого металла (T_f).

мощного нагревательного устройства на две плавильные печи. Для крупных печей рекомендуются конвейерные устройства, соединяющие нагревательные и плавильные печи.

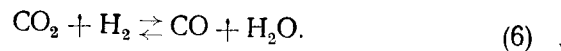
С целью снижения эксплуатационных затрат на электроэнергию рационально использовать для подогрева шихты природный газ или мазут. Эффективность подогрева шихты в пламенных печах по сравнению с электропечами зависит от соотношения коэффициентов полезного действия пламенной и электрической печей, от превышения калорийности газа над электрическим тепловым эквивалентом и от потребительской стоимости газа и электроэнергии. При обычно достигаемых показателях работы пламенных и электрических печей эффективность подогрева шихты в газовых печах в несколько раз выше.

В производстве применяются различные устройства для газового подогрева шихты. Одно из них представляет собой корзину со створчатым дном, которая имеет крышку с установленной на ней газовой горелкой [85]. Максимальная температура подогрева шихты в верхней части корзины — 850° С. Корзина проста по устройству, в то же время ее применение позволяет повысить производительность печей на 17—20%. Успешно используются и другие, более сложные подогреватели шихты [86, 97]. Поскольку все они не предохраняют шихту от окисления во время нагрева, подогрев стружки и мелкого скрапа в них нецелесообразен.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на процесс окисления стружки. При нагреве стружки в пламенных печах окисление ее протекает по следующим реакциям:



Равновесие реакций (4) и (5) достигается при определенных условиях сжигания газа в печах, когда между отдельными компонентами печной атмосферы CO_2 , CO , H_2 , H_2O устанавливается равновесие:



Реакция (6) является определяющей в процессе окисления и позволяет рассчитать условия равновесия печной атмосферы с металлом.

Условия сжигания топлива в печи, при которых металл не окисляется, можно определить, пользуясь диаграммой равновесия железа с продуктами сгорания топлива (рис. 10) [39]. Пучок прямых изотерм позволяет определить температуру, при которой данная смесь газов (CO_2 , CO , H_2O , H_2) удовлетворяет условию равновесия реакции водяного газа. На этой же диаграмме нанесены кривые постоянных значений коэффициентов расхода воздуха α , определяющие условия сжигания топлива в печи. Диаграмма, приведенная на рис. 10, дает наглядное представление о способности атмосферы окислять или восстанавливать железо при данных условиях сжигания топлива, т. е. при заданных значениях коэффициента расхода воздуха α и температуры. Из диаграммы видно, что для устранения окисления металла при заданной температуре нагрева необходимо поддерживать в печной атмосфере строго определенное соотношение CO_2/CO и $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$. Для всего интервала температур подогрева стружки условия безокислительного нагрева создаются при сжигании газа в печи с коэффициентом расхода воздуха, равным 0,5. При этом следует иметь в виду, что данные диаграммы указывают только на термодинамику процесса окисления и не учитывают кинетику процесса.

В реальных условиях в зависимости от различных факторов (наличие, например, в чугуне легирующих элементов, средство которых к кислороду выше, чем железа) при подогреве шихты значение коэффициента расхода воздуха при сжигании газа в печи может изменяться в определенном интервале в сторону уменьшения последнего. Влияние условий подогрева на окисление стружки

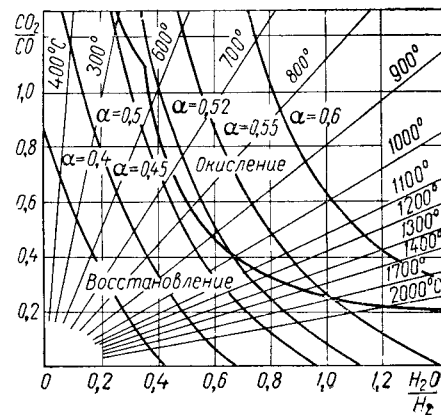


Рис. 10. Диаграмма равновесия реакции взаимодействия железа с продуктами сгорания метана.

было исследовано в Институте проблем литья Академии наук Украинской ССР на установке, представляющей собой проходную канальную печь с последовательно соединенными реакционной зоной, зоной нагрева и холодильником для охлаждения нагреваемой навески.

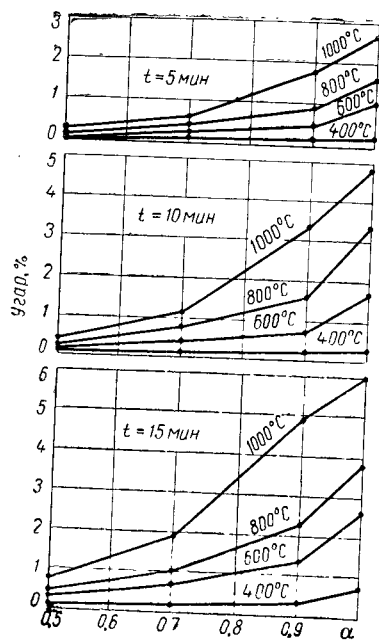


Рис. 11. Зависимость величины угара чугуна стружки от температуры, скорости нагрева и коэффициента расхода воздуха α (t — время нагрева стружки).

В реакционной зоне поддерживалась постоянная температура 1200°C , а в зоне нагрева стружки температурный режим устанавливался в соответствии с характером данного опыта. Навеска стружки быстро охлаждалась в холодильнике до комнатной температуры в течение 3—5 мин. Навеска охлаждалась в атмосфере аргона, подаваемого из баллона, что устраняло окисление стружки в процессе охлаждения.

Опыты проведены на природном газе следующего со-

В качестве реакционной зоны и зоны нагрева использовались электрические печи сопротивления с силовыми нагревателями типа ТК-30/200, в которые была вмонтирована кварцевая трубка диаметром 50 мм. В начале кварцевой трубки перед реакционной зоной установлен смеситель для предварительного перемешивания газа и воздуха. Реакционная зона до смесителя заполнялась шмотным боем, что увеличивало поверхность нагрева в этой зоне и устраняло просок пламени в смеситель.

При конструировании экспериментальной установки исходили из необходимости наиболее полного окисления газа при строго заданном коэффициенте расхода воздуха.

става, %: CH_4 — 97,8; C_2H_6 — 0,4; C_3H_8 — 0,29; C_4H_{10} — 0,11; C_5H_{12} — 0,05; CO_2 — 0,25; H_2O — 1,2.

Экспериментальные данные по окислению чугуна стружки несколько отличаются от теоретических. Согласно данным диаграммы равновесия железа с продуктами сгорания природного газа при сжигании последнего с коэффициентом расхода воздуха 0,5 металл не должен окисляться. В действительности наблюдается угар стружки, и тем заметнее, чем длительнее нагрев (рис. 11). При нагреве стружки до 1000°C в течение 15 мин с коэффициентом расхода воздуха, равным 0,5, угар стружки составляет около 0,75%. С увеличением расхода воздуха угар стружки возрастает. Окисляемость стальной стружки меньше чугуна, поэтому полученные значения угара характеризуют крайний случай, когда подогреваемая шихта полностью состоит из элементобразной чугуна стружки с большой поверхностью окисления. На основании экспериментальных данных можно рекомендовать режим предварительного подогрева шихтовых материалов в пламенных печах с коэффициентом расхода воздуха 0,5. Сотрудник ИПЛ АН УССР В. Н. Костяков предложил конструкцию барабанной автоматизированной печи для подогрева шихты, имеющей следующие технические показатели:

Производительность	5 т/ч
Рабочая температура	900°C
Температура подогрева стружки	600°C
К. п. д. печи	20,5%
Размеры печи:	
диаметр внутренний	1100 мм
диаметр наружный	2000 мм
длина барабана	600 мм
Количество горелок	2
Тип горелок	ГИП-8
Расход газа	265 м ³ /ч

Достоинством предварительного подогрева шихты является решение одновременно двух задач: основной — повышения эффективности работы индукционных печей и вспомогательной — очистки шихтовых материалов и примесей. Вторая задача может быть решена и отдельной технологической операцией — химической очисткой шихты. Например, для литейного цеха завода «Водоприбор» (г. Москва) запроектирована химическая очистка металлоотходов слабощелочным раствором едкого натрия с до-

Таблица 3

Составляющие раствора, г/л			Температура раствора, °С	Время обработки, мин
Едкий натр	Контакт Петрова	ДС-РАС		
50—70	10—20	—	60—80	5—10
40—50	—	5—10	60—80	5—10

бавлением поверхностно-активных веществ (табл. 3 [29]). Предпочтение следует отдавать раствору с эмульгатором ДС-РАС, так как при одинаковой эффективности для его приготовления требуется меньше реагентов. Подогрев стружки при обработке до 60—80°С должен облегчить ее последующую сушку за счет приобретенного тепла. Ориентировочная производительность установки 10 т/ч. Необходимость использования тех или других установок для очистки шихтовых материалов отпадает только в случае применения чистого кускового скрапа, чушковых чугунов, т. е. относительно дорогих исходных материалов. Если же плавильная установка не предназначена только для специальных целей (переплавка собственного возврата, чистых отходов основного производства; работы на жидкой завалке и т. п.), то целесообразно и необходимо предусматривать применение предварительного подогрева или очистки шихтовых материалов.

4. ФУТЕРОВКА ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Факторы, определяющие стойкость футеровки. В тигельных индукционных печах промышленной частоты расплавленный металл оказывает на футеровку термическое, химическое и эрозионное воздействие. От качества и длительности службы футеровки зависит экономичность работы плавильных печей и качество металла. Футеровка может быть изготовлена набивкой по шаблону с последующим спеканием, кладкой из фасонных огнеупорных изделий, послойной наваркой путем торкретирования, трамбования или напыления, либо вне печи в специальных прессформах. Для выплавки синтетического чугуна основным методом является набивка по шаблону.

Футеровочная масса с помощью трамбовки или вибратора уплотняется и затем спекается. Шаблон в дальнейшем расплавляется или извлекается. Реже применяют мокрую набивку и заливку футеровки с использованием воды и связующих материалов. При этих методах экономятся расходы на шаблон, но ухудшается качество футеровки и тратится дополнительное время на сушку печи.

Для крупных печей применяют кирпичную кладку, обладающую лучшими прочностными и физико-химическими показателями, чем набивная футеровка. Качество кирпичей тщательно контролируется, поэтому вероятность появления дефектов в футеровке уменьшается, повышается однородность и плотность тигля. Это улучшает распределение температур, уменьшает изменение объема футеровки при нагреве и опасность появления трещин. Стойкость кирпичной футеровки сопоставима со стойкостью монолитных огнеупоров.

Материал футеровки должен обладать достаточной огнеупорностью, стабильностью объема, устойчивостью против растрескивания, эрозии, разъедания металлом и шлаком, способностью к спеканию. Для обеспечения спекания к основному огнеупорному материалу добавляется связующее вещество, которым в случае кислой футеровки обычно является борная кислота. Поскольку футеровка служит разделительным барьером между расплавленным металлом и атмосферой, то вследствие большого градиента температур в футеровке различаются три зоны.

Первая (внутренняя) — спекшаяся, наиболее плотная зона, которая противостоит воздействию чугуна и шлака, постепенно разрушаясь. В зависимости от проникновения металла может быть подразделена на инфильтратную и неинфильтратную части.

Вторая — переходная зона, которая вследствие более низкой температуры менее спекается, чем первая зона, имеет меньшую прочность и большую пористость.

Третья — буферная зона, в которой отдельные зерна огнеупора почти не связаны. Эта зона обеспечивает компенсацию температурного расширения футеровки и препятствует прорыву металла.

Подготовленный к работе внутренний слой футеровки представляет собой конгломерат спекшихся гранул, между которыми находятся различные по форме и размеру

поры. Сочетание гранул и пор определяет структуру спекшейся зоны, причем поры могут быть полностью замкнутыми, т. е. не пропускающими жидкий металл и шлак, или открытыми, которые в большинстве случаев и образуются. Величина общей пористости и соотношение между количеством замкнутых и открытых пор обуславливают многие свойства футеровки, в частности ее прочность и стойкость. Гранулометрический состав, способ уплотнения, количество борной кислоты, температура и продолжительность спекания футеровки влияют на пористость и прочность спекшейся зоны.

Размыв и разъедание футеровки — часто единственная причина ее замены. При прочих равных условиях быстрее разрушается футеровка, имеющая открытые поры и неровную поверхность. В этом случае площадь взаимодействия увеличивается, вступают в действие капиллярные силы. Проникновению металла в футеровку способствует также сегрегация набивной массы, местное обеднение или обогащение ее связующим веществом. Не менее важно и качество уплотнения футеровки, в частности хорошее соединение слоев набивной массы. Для этого перед засыпкой очередной порции массы необходимо разрыхлять поверхность уже уплотненного слоя, иначе могут образоваться поперечные трещины в тигле. Состав футеровочной массы, способ уплотнения, режим спекания обычно контролируются и выдерживаются в требуемых пределах, но не меньшее внимание следует уделять условиям эксплуатации футеровки. Разрушению футеровки способствуют большие колебания температур, термические удары, агрессивные шлаки и примеси в металле, механические воздействия разного рода, недостаточная тщательность при загрузке шихтовых материалов и удалении шлака. Не рекомендуется быстро нагревать или охлаждать тигель; допускать образование «мостов» из шихты, вызывающих местный и неконтролируемый перегрев металла и футеровки; подвергать сотрясению или поворотам в холодном состоянии. Отрицательно влияет на стойкость футеровки повышенная вибрация индуктора. Ошлакование тигля печи предупреждают периодическим скачиванием шлака, особенно при плавке легированных сплавов, добавлением полевого шпата или перегревом расплава при полном заполнении тигля.

Чем больше объем тигля печи, тем больше сказывается влияние разрушающих факторов, что объясняется увеличением внутренних напряжений пропорционально объему тигля, возрастанием контактной поверхности футеровки с расплавом и шлаком, увеличением вероятности появления различных дефектов с возрастанием объема футеровки и работы по ее изготовлению.

Интенсивное электромагнитное перемешивание жидкого металла в печах промышленной частоты уменьшает срок службы футеровки. Осредненная скорость движения жидкого металла при допущении одномерной модели тигельной печи и отсутствия концевых эффектов, подсчитанная по методике работы [74] для температуры жидкого сплава 1500°C , в центре печи равна $4,1 \text{ м/сек}$. Однако в реальной печи при турбулентном течении металла возле стенок тигля, где напряженность магнитного поля выше, мгновенная скорость потока металла больше, чем осредненная и может быть выше критической кавитационной скорости, равной $5,5 \text{ м/сек}$ [57]. Поскольку шероховатость стенок тигля способствует возникновению явления кавитации, в практике эксплуатации печей промышленной частоты наблюдается разъедание футеровки, имеющее кавитационный характер. Кроме того, перемещение твердых частиц шихты и шлака движущимся металлом вызывает механические повреждения и размыв футеровки. Таким образом, с целью повышения стойкости футеровки следует избегать длительного интенсивного перемешивания жидкого металла в тигле печи.

Технический контроль качества футеровки регламентируется Государственными стандартами и техническими условиями. Методы испытания основных свойств огнеупоров подробно описаны в специальной литературе [45, 47, 56]. Качество футеровки в разных зонах можно оценить путем термического анализа, т. е. определения температур размягчения, начала плавления и начала течения материала футеровки. Эти температуры по зонам для кислой кварцевой футеровки приведены в табл. 4 [73].

Мерой стойкости футеровки печи можно принять вес проплавленного чугуна. Поскольку для печей различной мощности и объема вес проплавленного чугуна несравним, стойкость футеровки часто определяется количеством проведенных за кампанию плавов. Стойкость кислых набивных футеровок составляет около 250—300 плавов

[2, 35], однако при осторожной загрузке тигля чистыми шихтовыми материалами без агрессивных вредных примесей и рациональной эксплуатации печей продолжительность работы возрастает до 500 плавов и более [59, 79]. В период эксплуатации печи необходимо производить текущий ремонт тигля: очищать его от шлака, подтрамбовывать дно, заделывать размывы и т. д.

Таблица 4

Цвет зоны, начиная с внутренней	Температура, °С		
	размягчения	плавления	течения
Светлая	1440	1620	1660
Серая (переходная)	1520	1660	1700
Черная	1540	1640	1660
Желтая	1580	1710	1760
Красная	1620	1730	1765

Расход кислой футеровки при плавке серого чугуна обычно составляет 1,5—2,5 кг/т, чугуна с шаровидным графитом — 2,5—3,5 кг/т, при плавке легированных и ковких чугунов — 3—5 кг/т. Износ футеровки происходит постепенно и поддается непосредственному контролю. Замена ее производится обычно после определенной степени износа, еще до аварийного состояния.

Огнеупорные материалы. Высокое качество огнеупорных материалов — основное условие долговечности футеровки. Огнеупорные материалы должны обладать химической инертностью, высокими огнеупорностью и термостойкостью, малыми теплопроводностью и электропроводностью, постоянством объема при повторных нагревах, допускать простую технологию применения и быть дешевыми.

Огнеупорные материалы, которые могли бы найти применение в качестве футеровки индукционных печей, можно разделить на следующие группы: окислы, карбиды, нитриды, сульфиды, бориды и элементы. Многие из этих материалов должны быть исключены из-за способности к окислению или восстановлению при высоких температурах, а также вследствие гидратации при низких температурах, и только шесть простых окислов с температурой

плавления выше 1700°С можно принципиально считать приемлемыми — окислы алюминия, магния, кремния, бериллия, циркония и тория. Три последних окисла относятся к дорогим и дефицитным и применяются в основном для малых тиглей в научных исследованиях. Соединения на основе алюминия, магния и кремния, широко используемые для изготовления футеровки и огнеупоров, по сво-

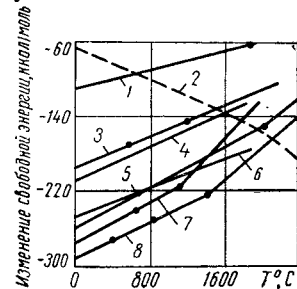


Рис. 12. Зависимость значения свободной энергии образования окислов от температуры:

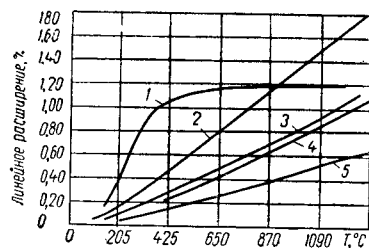
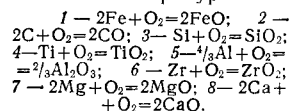


Рис. 13. Линейное расширение огнеупорных материалов:

1 — кварца; 2 — окис магния; 3 — окис хрома; 4 — глинозема; 5 — окис циркония.

ему химическому характеру различны и делятся на кислые, основные и нейтральные. К кислым огнеупорным материалам относятся кремнезем, кварциты и кварцевые пески, диас, шамот; к основным огнеупорам — окись магния, магнезитовые, доломитовые магнезитохромитовые, хромомagneзитовые и форстеритовые изделия. Группу нейтральных огнеупоров составляют глиноземистые, силлиманитовые, муллитовые, корундовые, цирконовые и углеродистые материалы.

Наиболее общей характеристикой устойчивости отдельных соединений в жидком металле может служить величина свободной энергии их образования из элементов. Стабильные соединения обладают максимальным отрицательным значением свободной энергии. По общей устойчивости при высоких температурах интересующие нас окислы можно расположить в следующем порядке по убыванию их стойкости: двуокись циркония, глинозем, окись магния, кремнезем (рис. 12). Наибольшей химической инертностью обладают два первых окисла,

Значение термического расширения, теплопроводности и электросопротивления огнеупорных материалов при высоких температурах также самые низкие у окиси циркония и глинозема (рис. 13).

Основная футеровка при плавке чугуна применяется обычно только в печах малой емкости, поскольку основные материалы типа магнезита относительно дорогие и обладают высокими коэффициентами теплопроводности и термического расширения. В больших печах почти неизбежно появление трещин в футеровке. Магнезитовая футеровка используется главным образом в сталеплавильном производстве, где температура процесса и агрессивность шлака велики.

Глиноземистую футеровку начали применять сравнительно недавно. Обычно такая футеровка выполняется из пластической массы и требует медленной сушки. Рекомендуется сушку и спекание высокоглиноземистой футеровки производить по следующему режиму: в течение первого часа печь включается периодически на 5 мин с интервалами по 5 мин. В течение второго часа печь включается периодически на 15 мин с теми же интервалами. Затем на протяжении 11 ч постепенно повышают температуру до 1450°C и выдерживают при ней футеровку в течение часа [100]. Обладая высокой огнеупорностью (до 1800°C), футеровка на основе глинозема так же, как кварцитовая, не обеспечивает объемной стабильности, но стоимость ее значительно дороже кварцитовой. Поэтому в чугуноплавильном производстве глиноземистая футеровка, как набивная, так и фасонные огнеупорные изделия, широко применяется там, где необходима длительная стойкость футеровки — в канальных индукционных печах, крупных тигельных печах. В некоторых случаях применяются муллитовые и силлиманитовые футеровки, изготовляемые с добавлением борной кислоты.

Кислая футеровка индукционных печей в чугуноплавильном производстве выполняется обычно из молотого кварцита или кварцевого песка. От магнезитовых и глиноземистых футеровок она выгодно отличается дешевизной и тем, что усадка компенсируется ростом кварца при аллотропических превращениях. Расширение футеровки обуславливает замедленное спекание набивных стенок футеровки, благодаря чему длительно сохраняется порошкообразный буферный слой. Безопасность эксплуатации

печей с кислой футеровкой обеспечивается тем, что буферный слой предотвращает прорыв жидкого металла к индуктору. Кислая футеровка достаточно инертна по отношению к жидкому чугуну и шлаку и обладает хорошей огнеупорностью. Эти преимущества, в особенности доступность и дешевизна, обусловили широкое применение кислой футеровки.

Кремнезем в кварците в исходном состоянии присутствует в форме кварца. Во время спекания и эксплуатации футеровки кварц частично переходит в стабильные модификации (α -кварц, α -тридимит и α -кristобалит). В спекленном слое футеровки обнаруживаются все три модификации кремнезема. Объемное расширение основных модификаций кремнезема заканчивается при относительно низких ($600\text{--}800^{\circ}\text{C}$) температурах. При медленном подъеме температуры печи образующиеся в кислой футеровке мелкие трещины исчезают до появления жидкого металла. Магнезитовая или глиноземистая футеровка расширяется непрерывно по мере возрастания температуры. Кремнеземистая футеровка чувствительна к тепловым нагрузкам в отдельных температурных диапазонах из-за больших объемных изменений при кристаллических превращениях ($+16\%$ α -тридимит; $+3\%$ α -кristобалит). Теплопроводность кремнезема при 1100°C равна $3,8 \cdot 10^{-4}$ кал/сек·см·град; коэффициент линейного расширения — $3,0 \cdot 10^{-6}$ г/град; удельное электросопротивление при 1300°C — $5 \cdot 10^3$ ом·см [60]. Физические и эксплуатационные свойства кремнезема изменяются в зависимости от его химической чистоты. Температура плавления кремнезема существенно снижается при наличии даже небольших примесей глинозема, окислов железа, кальция. Чем чище кремнезем, тем лучше он противостоит действию химических агентов. Поэтому огнеупорные футеровки, изготовленные из кварцитов или кварцевого песка различных месторождений, характеризуются неодинаковой стойкостью. Более долговечными в эксплуатации оказываются футеровки с высоким содержанием кремнезема. На стойкость футеровки также оказывают влияние минералогический и зерновой состав применяемых материалов.

Кислая футеровка, изготовленная из кварцитов Первоуральского и Овручского месторождений, после спекания обычно имеет следующие свойства:

Огнеупорность, °C	1710—1730
Температура деформации под нагрузкой 2 кг/см ² , °C	1400—1600
Предел прочности при сжатии, кг/см ² :	
при 200° C	600
при 1000° C	150—300
при 1600° C	20—60
Плотность, г/см ³	2,3—2,5
Пористость, %	15—25
Линейное расширение, %:	
при 20° C	0,2
при 1000° C	0,3—1,8
при 1600° C	7—8

Футеровка из кварцитов с добавлением борной кислоты в качестве связки используется для плавки не только чугуна, но и углеродистых сталей. Применять кислые электропечи для плавки легированных железоуглеродистых сплавов и рафинирования не рекомендуется вследствие протекания «тигельных» реакций и резкого уменьшения стойкости футеровки.

Гранулометрический состав и уплотнение футеровочной массы. Зерновой состав масс в значительной степени определяет плотность огнеупоров, их прочность, рост, время спекания. Состав футеровочных масс зависит от происхождения исходных материалов и условий работы. В табл. 5 приведены рекомендации по составу футеровочных масс для плавки чугуна из немецких и шведского кварцитов. Минералогический состав последнего: SiO₂—98,22%; Al₂O₃—1,07%; Fe₂O₃—0,26%; MgO—0,18%; Na₂O—0,11%; H₂O—0,25%.

Гранулометрический состав футеровочной массы определяет количество контактов в единице объема. Оптимальный состав характеризуется заполнением пустот между крупными зернами более дисперсными, причем плотность

Таблица 5.

Таблица								
Литературный источник	Зерновой состав, %					Борная кислота, %	Плотность, г/см³	Огнеупорность, °С
	Размер фракций, мм							
	0,66	0,06—0,2	0,2—1,0	1—7	2—3			
[59]	—	30—35	30—35	30—35	—	2,0	2,1	1720
[75]	—	20	45	—	25	1—3	2,2	1730
[80]	13—21	13—23	35—47	18—30	—	1—1,6	2,6	1730

массы и число точек соприкосновения между зернами повышается. Влияние гранулометрического состава кремнезема на плотность футеровочной массы исследовалось при использовании кварцевого песка Аникшайского карьера, отходов песка Паневежского стекольного завода (Литовская ССР) и маршалита. Гранулометрический и минералогический составы материалов приведены соответственно в табл. 6 и 7. Фракционный состав

песков Аникшайского карьера имеет рассредоточенный характер, содержание кремнезема в песках высокое, поэтому пески могут служить заменителями кварцитов. Влияние гранулометрического состава футеровочной массы на плотность в спрессованном состоянии исследовалось в девяти вариантах (табл. 8). Предварительно прокаленная при 1200° C в течение 2 ч футеровочная масса прессовалась на универсальной машине «Амслер» в глухой прессформе при удельных давлениях 200—1500 кг/см². При этом контролировались объем, объемный вес и пористость образцов. Результаты исследования по вариантам табл. 8 приведены на рис. 14. Пористость образцов зависит от количества мелкой, средней и крупной фракций песка. При увеличении количества средней фракции до 20% плотность прессованных образцов повышается. Минимальная пористость футеровочной массы достигается при содержании 10—20% средней (0,16—0,63 мм), 30—40% мелкой (0,05—0,16 мм) и 50% крупной (0,63—1,6 мм) фракций. С увеличением удельного давления пористость уплотненной массы любого из вариантов уменьшается, но приведенный выше состав является оптимальным во всем интервале давлений.

Нельзя согласиться с мнением о положительном влиянии неплотной набивки футеровки для компенсации расширения при температурных превращениях кремнезема,

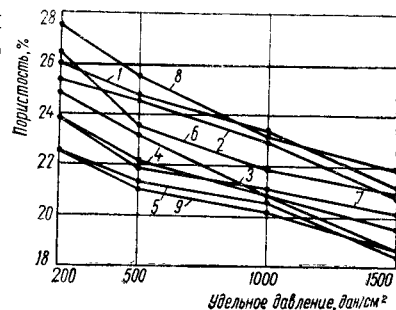


Рис. 14. Влияние гранулометрического состава и давления прессования на плотность футеровки (номера кривых соответствуют вариантам составов в табл. 8).

массы и число точек соприкосновения между зернами повышается. Влияние гранулометрического состава кремнезема на плотность футеровочной массы исследовалось при использовании кварцевого песка Аникшайского карьера, отходов песка Паневежского стекольного завода (Литовская ССР) и маршалита. Гранулометрический и минералогический составы материалов приведены соответственно в табл. 6 и 7. Фракционный состав песков Аникшайского карьера имеет рассредоточенный характер, содержание кремнезема в песках высокое, поэтому пески могут служить заменителями кварцитов. Влияние гранулометрического состава футеровочной массы на плотность в спрессованном состоянии исследовалось в девяти вариантах (табл. 8). Предварительно прокаленная при 1200° C в течение 2 ч футеровочная масса прессовалась на универсальной машине «Амслер» в глухой прессформе при удельных давлениях 200—1500 кг/см². При этом контролировались объем, объемный вес и пористость образцов. Результаты исследования по вариантам табл. 8 приведены на рис. 14. Пористость образцов зависит от количества мелкой, средней и крупной фракций песка. При увеличении количества средней фракции до 20% плотность прессованных образцов повышается. Минимальная пористость футеровочной массы достигается при содержании 10—20% средней (0,16—0,63 мм), 30—40% мелкой (0,05—0,16 мм) и 50% крупной (0,63—1,6 мм) фракций. С увеличением удельного давления пористость уплотненной массы любого из вариантов уменьшается, но приведенный выше состав является оптимальным во всем интервале давлений.

Нельзя согласиться с мнением о положительном влиянии неплотной набивки футеровки для компенсации расширения при температурных превращениях кремнезема,

Таблица 6

Наименование материалов	Зерновой состав, %, при размере фракций, мм										Всего
	1,6	1,0	0,63	0,40	0,315	0,20	0,16	0,10	0,063	0,05	
Кварцевый песок	1,05	10,22	7,25	9,04	13,35	19,34	17,34	7,58	2,83	0,44	10,85
Отходы кварцевого песка	6,80	49,20	2,50	3,20	7,10	9,20	4,10	3,00	9,20	2,10	3,20
Пылевидный кварц	0,21	1,45	1,18	0,25	0,74	2,05	2,35	3,05	2,90	8,25	78,30
											99,49
											99,60
											99,73

Таблица 7

Наименование материалов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MnO	K ₂ O+MnO	Прочие	Всего
Кварцевый песок	99,4	0,20	0,08	0,10	Следы	0,15	0,13	100,06
Отходы кварцевого песка	99,2	0,30	0,11	0,20	»	0,10	0,08	99,99
Пылевидный кварц	96,5	1,53	0,71	0,31	»	0,35	0,21	99,61

Таблица 8

Фракция песка, мм	Зерновой состав, %								
	Варианты составов								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,6—0,63	50	45	50	45	50	40	40	30	50
0,63—0,16	—	5	5	10	10	10	20	20	20
0,16—0,05	50	50	45	45	40	50	40	50	30

так как при этом трудно ожидать существенного уменьшения пористости футеровки и увеличения межзерновых контактов. Уплотнение футеровочной массы производится ручной или пневматической трамбовкой, а также вибратором. Для крупных печей применяются только механи-

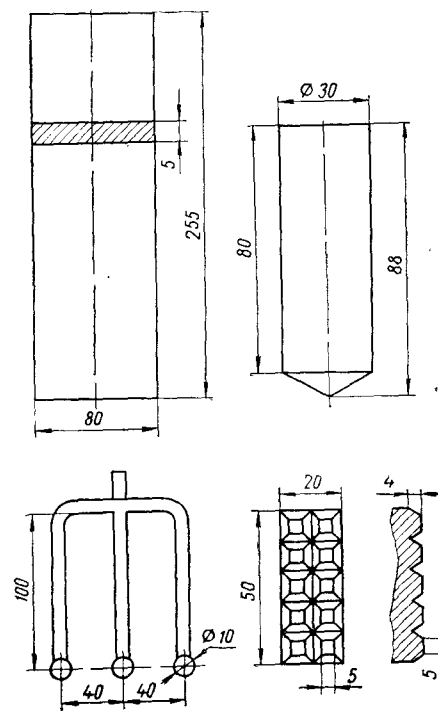


Рис. 15. Формы наконечников трамбовок.

зированные способы набивки, для текущего ремонта—специальные механизмы заправки и наварки стенок и подины. С целью определения влияния способа уплотнения на качество и стойкость кислой футеровки исследовалось 30 футеровок оптимального гранулометрического состава в печи высокой частоты ИО-102 с емкостью тигля по чугуну 150 кг. Количество борной кислоты во всех футеровках составляло 1,5%. Спекание футеровок производилось в течение 6,5 ч по одному температурному режиму. В печи полностью наплавлялся чугун, перегревался до 1450° С и

выдерживался при этой температуре в течение 2 ч. После окончания плавки и остывания футеровки из стенки тигля на расстоянии 30 см от дна вырезались образцы для исследований. Результаты проведенных измерений плотности и пористости футеровок даны в табл. 9. Объем между асбестовой прокладкой и шаблоном для каждой футеровки высчитывался отдельно, так как размеры шаблонов не были стабильными. Минимальная пористость футеровки достигается при уплотнении вибратором с подпрессовкой (15,9%), затем при уплотнении пневматической трамбовкой с вилообразным наконечником (17,2%). При вибрационном уплотнении наблюдалась сегрегация футеровочной массы и местное отслаивание после проведения плавки. Очевидно, для эффективной реориентации больших зерен кремнезема в смеси и их плотнейшей упаковки необходима большая амплитуда вибрации. Тем, что различные по величине зерна футеровки под воздействием работающего вибратора перемещаются с различными скоростями и амплитудами, можно объяснить сегрегацию футеровочной смеси при уплотнении.

Таблица 9

Форма наконечника (рис. 15)	Объемный вес, г/см ³	Удельный вес, г/см ³	Средняя пористость, %
Уплотнение ручной трамбовкой			
Лопатка	1,95	2,501	22,03
Острый штырь	1,92	2,501	22,73
Рифленый штамп	1,97	2,501	21,13
Вилообразный	2,00	2,501	20,20
Уплотнение пневматической трамбовкой			
Лопата	1,97	2,498	21,00
Острый штырь	2,00	2,498	21,20
Рифленый штамп	2,02	2,498	19,20
Вилообразный	2,07	2,498	17,17
Уплотнение вибратором			
Без подпрессовки	2,00	2,498	20,77
С подпрессовкой 0,1 кг/см ²	2,10	2,498	15,90

Однородность уплотнения огнеупорной массы оказывает существенное влияние на стойкость футеровки особенно при большом объеме работ на крупных печах (рис. 16). Для предотвращения сквозного спекания дна тигля и обеспечения последующей выбивки футеровки на подину подготовленной печи засыпается и уплотняется слой футеровочной массы без борной кислоты. После уплотнения следующего слоя футеровочной массы, образующего дно тигля, специальным скребком вырезается место для установки шаблона, который тщательно центрируется и укрепляется деревянными клиньями. Пространство между шаблоном и асбестовой изоляцией последовательно набивается футеровочной массой. Затраты

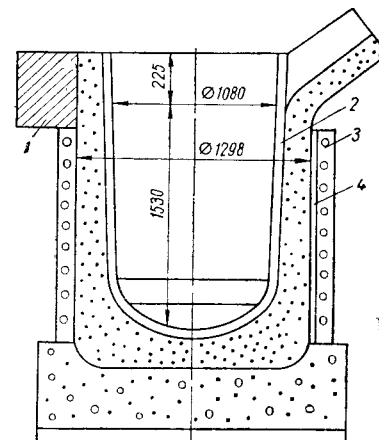


Рис. 16. Футеровка восьмитонной индукционной тигельной печи: 1 — насадка печи; 2 — шаблон; 3 — индуктор; 4 — слой асбеста.

труда на эту операцию довольно значительны. Например, при механизированной набивке тиглей индукционных печей футеровка двухтонной печи продолжается 3 ч, занято 3 рабочих; тридцатитонной печи — 23 ч, занято 7 рабочих [102]. При набивке тигля нельзя допускать перерывов в работе, так как это отражается на однородности футеровки и вызывает ее расслоение. Не допускается попадание в набивную массу посторонних частиц (асбеста, окалины, металла и т. п.), так как они ослабляют структуру и прочность футеровки.

Влияние борной кислоты и температуры спекания на качество футеровки. Борная кислота (H_3BO_3) относится к сильным спекающим агентам. В набивной футеровке при высоких температурах она плавится и обеспечивает спекание зернистой массы, приобретающей необходимую для эксплуатации механическую прочность футеровки. Существенный недостаток борной кислоты — увеличение усадки футеровки и ее склонности к трещинообразованию.

При спекании борная кислота образует с кремнеземом боросиликатное тугоплавкое стекло, присутствие которого не влияет на огнеупорность футеровки. Другие спекающие добавки (жидкое стекло, цементы, плавильный шпат и т. д.) для кислой футеровки не имеют такого широкого применения в чугунолитейном производстве, как борная кислота.

Влияние количества борной кислоты и температуры спекания на плотность и прочность футеровки исследовалось на уплотняемых пневматической трамбовкой с вилообразным наконечником футеровках оптимального граулометрического состава. Прочность на сжатие определялась по образцам кубической формы с размером грани 15 мм, вырезанных из футеровки. Пористость футеровки в различных слоях и ее удельный вес определялись по ГОСТ 2409-53 и ГОСТ 2211-43 соответственно.

С увеличением количества борной кислоты в набивной смеси пористость футеровки уменьшается как в спекшейся (сплошная линия), так и в переходной (штрих-пунктирная линия) зонах (рис. 17). С увеличением температуры спекания пористость футеровки также уменьшается. В переходной зоне пористость несколько больше, чем в спекшейся зоне, причем с увеличением содержания борной кислоты эта разница уменьшается. Очевидно, пористость уменьшается вследствие увеличения количества образующегося боросиликатного стекла при повышении содержания борной кислоты и температуры спекания.

Прочность футеровки в определенной степени связана с ее пористостью и увеличивается с повышением содержания борной кислоты в набивной массе (рис. 18). В переходной зоне (штрих-пунктирная линия) прочность футеровки на 15—25 кг/см² ниже, чем в спекшейся зоне (сплошная линия). С повышением температуры спекания от 1450° (а) до 1550° С (б) прочность футеровки снижается вследствие уменьшения связующей способности боросиликатного стекла.

Относительное положение зон футеровки изменяется от содержания борной кислоты в набивной массе и температуры спекания, хотя влияние последней менее значительно (рис. 19). С увеличением количества борной кислоты и температуры спекания зона увеличивается. Толщина переходного слоя футеровки остается при измене-

нии факторов спекания почти неизменной. Буферный слой свободных зерен при активизации спекания может получиться, таким образом, недостаточной толщины и не будет выполнять своей защитной роли. Поэтому рекомендуется подбирать содержание борной кислоты в набивной смеси в зависимости от средней температуры эксплуатации тигля печи (рис. 20).

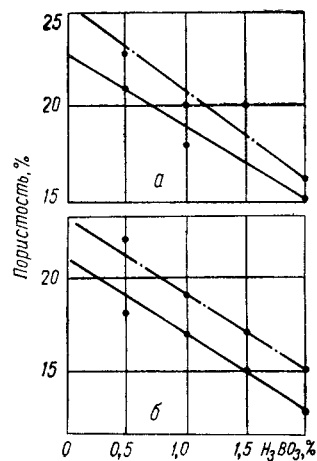


Рис. 17. Зависимость пористости футеровки от увеличения количества борной кислоты при перегреве чугуна до 1450° С (а) и 1550° С (б) и выдержке 2 ч.

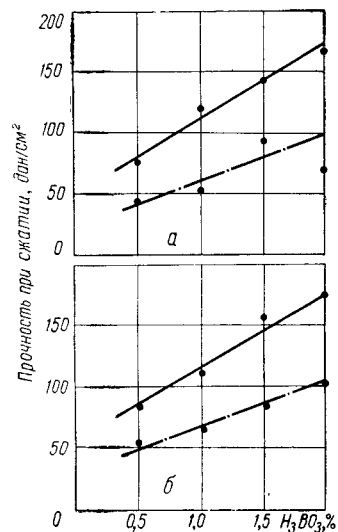


Рис. 18. Влияние количества борной кислоты и температуры спекания на прочность футеровки.

Для чугуноплавильного производства рациональным содержанием борной кислоты следует считать 1,6—1,8%.

С целью обеспечения хорошего спекания набивной массы и минимальных внутренних напряжений в футеровке необходимо выдерживать определенный режим спекания, который зависит от состава футеровки, размеров тигля, его рабочей температуры, выплавляемого металла и т. д. При тщательной тепловой изоляции тигля толстым слоем асбеста (15—20 мм) теплоотвод от стенок тигля значительно уменьшается, спекание огнеупорной футеровки происходит быстрее и равномернее. Для

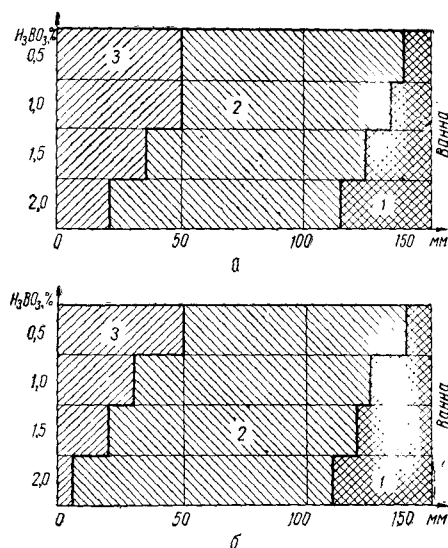


Рис. 19. Диаграмма образования спекшейся (1), переходной (2) и свободной (3) зои при спекании футеровки и перегреве чугуна до 1450° С (а) и 1550° С (б).

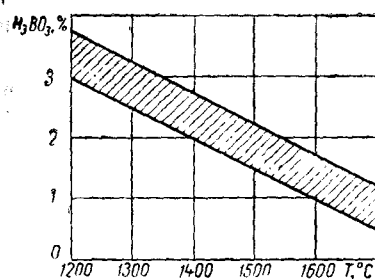


Рис. 20. Рекомендуемое содержание борной кислоты в кислой набивной футеровке в зависимости от рабочей температуры печи.

каждого конкретного случая эксплуатации печей следует выбирать соответствующий режим спекания. Если для футеровки печей емкостью 6—10 т использовать описанные выше пески Аникшайского карьера оптимального гранулометрического состава с содержанием 1,6—1,8% борной кислоты, то рекомендуются следующие режимы спекания. При спекании с холодной садкой на дно тигля загружаются пусковые блоки, близкие по диаметру к размерам шаблона. Печь включается на малую нагрузку и медленно нагревается до 600—700° С, затем пусковые блоки расплавляются, добавляется шихта до полного заполнения ванны, перегревается до 1500° С и выдерживается в течение 20—30 мин. Весь процесс спекания длится 8 ч.

При спекании с горячей садкой в нагретый индукционным способом до 900—1000° С шаблон заливают жидкий чугун с температурой 1250—1300° С. Через 15—20 мин включают печь, доводят температуру до 1500° С и выдерживают 50—60 мин. Весь процесс длится 6,5—7 ч.

Приведенные выше рекомендации по составу и технологии изготовления кислой огнеупорной футеровки внедрены на Каунасском чугунолитейном заводе «Центролит» при выплавке синтетического чугуна в индукционных печах промышленной частоты емкостью 6—8 т. Физико-механические свойства и стойкость производственных футеровок приведены в табл. 10. Количество выплавленного в печах металла за кампанию при двухсменной работе достигает 1000 т и зависит от пористости (а) и прочности (б) футеровки (рис. 21). Тигли заменяются в среднем через 30 рабочих дней, расход футеровочной массы составляет 2—2,5 кг/т.

Наблюдавшиеся изменения в стойкости футеровки обусловлены использованием для переплавки неподготовленной стружки различной степени окисленности и с различным содержанием вредных примесей.

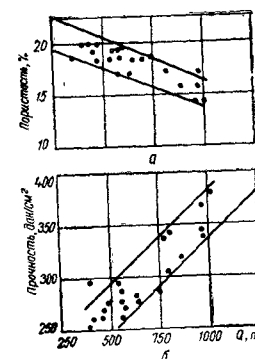


Рис. 21. Влияние свойств футеровки на количество выплавленного за кампанию синтетического чугуна (Q).

Таблица 10

Футеровка	Слепшаяся зона			Переходная зона			Количество выглавленной за кампанию, т	Расход футеровочной массы, кг/т
	Удельный вес, г/см ³	Пористость, %	Прочность при сжатии, кг/см ²	Удельный вес, г/см ³	Пористость, %	Прочность при сжатии, кг/см ²		
1	2,35	15	288	2,46	18	230	27	2,53
2	2,36	14	302	2,44	17	251	26	2,46
3	2,40	16	278	2,49	19	240	19	3,50
4	2,35	13	330	2,46	16	248	32	2,06
5	2,37	14	315	2,48	16	265	33	2,28
6	2,39	14	338	2,50	17	256	31	2,04
7	2,36	12	380	2,44	14	295	38	1,98
8	2,37	12	360	2,45	14	285	34	2,11

5. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ПЛАВКИ

Контроль качества футеровки и состояния изоляции контура индукционных печей. Наименее стойкими в эксплуатации элементами конструкции индукционных тигельных печей являются тигли и электрическая изоляция индукторов. Повреждение тигля или электрической изоляции индуктора выводит печь из строя. Поэтому контроль состояния тигля и изоляции индуктора имеет большое значение.

Принцип действия разработанных до настоящего времени в СССР и за рубежом устройств, контролирующих работу тиглей индукционных печей, основан на контроле электросопротивления футеровки. Недостатки этих устройств следующие.

1. Существует большое количество неисследованных факторов, влияющих на значение сопротивления футеровки и на получение четкого своевременного сигнала при разрушении тигля. Сопротивление футеровки изменяется в ходе кампании и при износе тигля зависит от состояния и типа применяемых для набивки масс, технологии изготовления тигля, его геометрии и размеров.

2. Весьма затруднительна установка датчиков-электродов.

3. Отсутствует возможность контроля качества изоляции контура.

С целью устранения этих недостатков был создан сигнализатор, работающий на принципе измерения утечки тока на землю через изоляцию электрической системы индуктора, вторичную обмотку силового трансформатора, а также через стенки тигля от индуктора к заземленному металлу (рис. 22). На среднюю точку индуктора, через реле ЭН (реле напряжения переменного тока с гибкой регулировкой установки срабатывания) и фильтр (L, C) подан «плюс» схемы сигнализатора. Реле ЭН шунтируется вольтметром V, который показывает падения напряжения как со стороны металла, так и со стороны изоляции индуктора (конденсаторных батарей, охлаждения, соединительных кабелей и вторичной обмотки силового трансформатора).

Схема сигнализатора собрана из двух блоков: первый — контрольная аппаратура, вспомогательные цепи и цепи питания прибора, второй — фильтр низкой частоты,

который связан с первым блоком (реле ЭН) и индуктором соответственно проводом ПГ-3000 1,5 мм² и гибким проводом высокого напряжения.

Фильтр состоит из двух конденсаторов и катушки индуктивности. Катушка индуктивности и предохранитель Пр₁ тщательно изолируются от корпуса установки. Лампы ЛЗ, ЛК, реле РП, ревуны, кнопка деблокировки могут

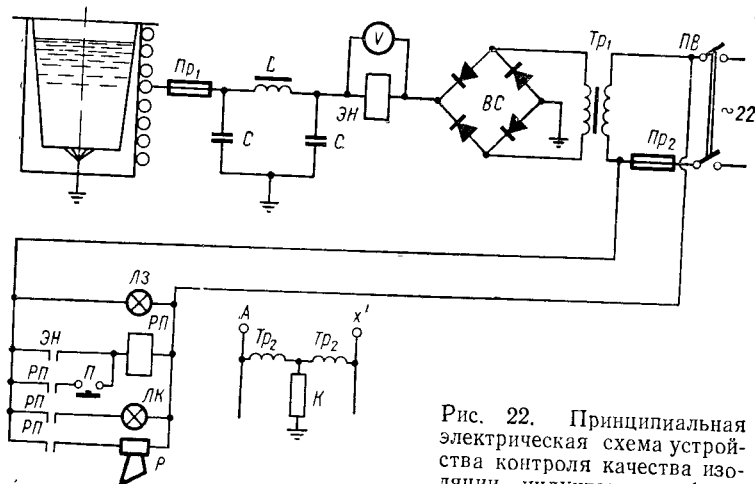


Рис. 22. Принципиальная электрическая схема устройства контроля качества изоляции индуктора и футеровки.

быть разных типов. Контакты реле РП, с помощью которых отключается печь, должны соответствовать номинальным токам контакторов печи или промежуточных реле.

В схеме имеются две пары контактов реле РП, один из которых может быть использован по местным условиям для отключения печи. Выпрямитель ВС может быть любой конструкции и типа, если он соответствует напряжению — в данном случае до 1200 в. Предохранитель Пр₂ рассчитан на 2 а.

Отечественные печи емкостью 10 и 8 т с включением водяного охлаждения имеют сопротивление корпуса установки около 3 ком. При нормальной работе напряжение в схеме равно 25—30 в. При включении включателя ПВ срабатывает реле ЭН (70—80 в). После разрядки конденсаторов деблокировочной кнопкой К схема считается подготовленной к работе. Необходимо один раз в смену опро-

бовать целостность схемы, т. е. при отключении печи заземлить индуктор и отключить сигнализатор; вольтметр должен показывать напряжение около 120 в; реле ЭН должно срабатывать. Можно поставить два трансформатора напряжения, заземлив их нулевую точку через кнопку К. При нажатии кнопки с нормально открытыми контактами срабатывает кнопка К, которая через трансформатор напряжения заземляет шины индукционной печи. Сигнализатор должен сработать. Схема в этом случае исправна.

Сигнализатор срабатывает, когда расплавленный металл касается индуктора (печь отключается мгновенно, металл не перемещивается, дальше не нагревается и, коснувшись охлажденного индуктора, застывает) или когда повреждена изоляция индуктора, соединительного кабеля, конденсаторов, шин или вторичной обмотки силового трансформатора.

При срабатывании сигнализатора необходимо установить, прошел ли расплавленный металл через стенку тигля или повреждена изоляция установки. В этом случае после отключения индукционной печи надо отключить сигнализатор от датчиков, зачистить верхнюю часть зашлакованного тигля от шлака до чистой футеровочной массы, чтобы расплавленный металл не имел контактов с корпусом, и повторно включить сигнализатор.

Если вольтметр показывает 25—30 в, это значит, что металл прошел через стенку тигля и печь необходимо остановить на ремонт, если — 100—200 в, — изоляция установки печи пробита.

Схема сигнализатора проста и надежна в работе. Во время спекания футеровки сигнализатор должен быть отключен из-за опасности выделения влаги во время спекания, а также в начале работы в течение 20 ч.

Контроль температуры и режима плавки. Основным средством контроля температуры жидкого чугуна до сих пор являются яркостные пирометры с исчезающей нитью. С увеличением температуры характер и интенсивность излучения изменяются. Поскольку с помощью пирометра получают не истинную, а яркостную температуру, для оценки практической погрешности измерения одновременно определяли яркостную и истинную температуры разных марок чугуна в тигельных печах и отбирали пробы на химический анализ. Яркостную температуру измеряли пирометром ОППИР-0,17, а истинную — платино-

платинородиевой термопарой (табл. 11). Из табл. 11 видно, что при оптическом контроле температуры, помимо прочих условий, необходимо учитывать и химический состав металла, что значительно усложняет контроль.

Следует отметить относительно невысокую точность измерения температуры оптическими пирометрами. Результаты исследований [49] показывают, что средняя

Таблица 11

Марка чугуна	Химический состав, %		Температура, °С		
	С	Si	яркостная	истинная	поправка
СЧ 18-36	3,87	2,02	1400	1480	+ 80
СЧ 21-40	3,60	2,05	1400	1470	+ 70
СЧ 24-44	3,51	1,60	1370	1450	+ 80
СЧ 28-48	3,35	1,57	1360	1460	+100
СЧ 32-52	3,01	1,47	1340	1450	+110

ошибка определения температуры с помощью оптического пирометра типа ОППИР-17 равна $\pm 27,3^\circ\text{C}$ при среднем значении температурной поправки $+61^\circ\text{C}$. Низкая точность измерения температуры, сильное влияние чистоты поверхности металла, угла наклона прибора, химического состава чугуна обуславливают возможность применения оптических пирометров только для грубой текущей оценки температуры металла; для получения же надежных результатов необходимо использовать термопары погружения. Однако применение термопар погружения ограничено вследствие отсутствия термостойких наконечников, надежно работающих в течение длительного времени. Другим методом контроля температуры металла является установление для данной печи зависимости температуры от удельного расхода электроэнергии.

При фиксированной частоте термический к. п. д. установки зависит от параметров индукционной установки, от степени заполнения тигля жидким металлом и твердой завалкой, от свойств футеровки и подведенной мощности. Практически все параметры можно считать относительно постоянными, кроме степени заполнения тигля и величины подведенной мощности. Система автоматической

компенсации реактивной мощности поддерживает в основном постоянное значение сдвига фаз между индуктивным и реактивным токами. Поэтому значение $\cos\varphi$ также можно применять постоянным. Коэффициент полезного действия

$$\eta = \eta_e \eta_t \eta_n \eta_{\pi} \quad (7)$$

где η_e — электрический к. п. д.; η_t — термический к. п. д., η_c — потери в сети; η_{π} — потери в трансформаторе.

В формуле (7) нас интересует значение термического к. п. д., прочие являются примерно постоянными для данной установки. При этих допущениях подведенное к металлу количество тепла можно выразить следующим образом:

$$Q = AN\eta_t \Delta t \text{ [ккал]}, \quad (8)$$

где $A = 860 \text{ ккал}$; N — расход электроэнергии, квт/ч ; τ — время, ч .

Увеличение теплосодержания чугуна

$$Q = Mc_p \Delta T \text{ [ккал]}, \quad (9)$$

где M — масса чугуна, кг ; c_p — удельная теплоемкость, $\text{ккал/кг}^\circ\text{град}$; T — температура, $^\circ\text{C}$. Отсюда

$$\Delta T = \frac{Q}{Mc_p} = AN\eta_t \Delta t \text{ [град]}. \quad (10)$$

Обозначив удельный расход энергии через $\frac{N}{M} = N_i$ ($\text{квт} \cdot \text{ч/кг}$), учтем две переменные величины — мощность и степень заполнения печи.

Переходя к пределам, имеем

$$\Delta T = \frac{AN_i \eta_t}{c_p} \int_0^{\tau} d\tau = k_i N_i \tau \text{ [град]}. \quad (11)$$

Таким образом, увеличение температуры металла будет в основном зависеть от расхода электроэнергии, теплоемкости металла и термического к. п. д. На основе экспериментальных данных построена номограмма контроля режима плавки (рис. 23). По номограмме можно определять температуру металла в зависимости от времени и удельного расхода электроэнергии.

Контроль химического состава. Плавка синтетического чугуна в индукционных тигельных печах характеризуется высокой вариативностью химического состава металла и его температуры. Поскольку эти параметры изменяются гораздо быстрее и легче, чем при ваграночной плавке, важное значение приобретает организация быстрого

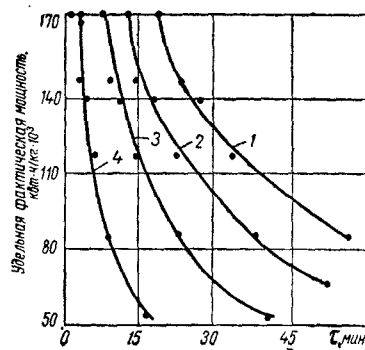


Рис. 23. Номограмма контроля температуры в тигельной печи промышленной частоты при повышении температуры на 150° С (1), 100° С (2), 50° С (3) и 25° С (4).

и действенного контроля режима плавки и характеристик жидкого металла. Недостаточный контроль плавки вызывает, как правило, несоответствие по химическому составу и ухудшение прочностных и литейных свойств металла, чем часто дискредитируются достоинства этого метода плавки.

Из основных методов современной техники для экспресс-анализа состава чугуна (химический спектрографический и термографический анализы, метод определения электросопротивления твердого образца) были выбраны спектрографический и стилоскопический методы. Диапазон определения концентраций элементов (от тысячных долей до десятков процентов) позволяет на одном приборе осуществлять контроль почти всех компонентов чугуна. Контроль химического состава чугунов проводится по ходу плавки и после его выпуска аналитическим и спектральным методами анализа (табл. 12).

Экспресс-анализ чугуна по ходу плавки на кремний и марганец проводится с помощью стилоскопа марки СП-11А. Пробы для химического анализа чугуна спектральным методом отливаются в кокиль для стабильного получения отбеленного чугуна и быстрого охлаждения во избежание неоднородности структуры за счет сегрегации. Содержание углерода в чугуне периодически определяется методом сжигания. Если при этом химический состав не соответствует требуемому, производится корректиров-

ка состава: для повышения содержания углерода на 0,1 % добавляется 1,5 кг электродного порошка в расчете на 1 т чугуна; для снижения концентрации кремния на 0,1 % добавляется 60 кг стали и 1,7—2,0 кг электродного порошка в расчете на 1 т чугуна; для снижения содержания углерода на 0,1 % добавляется 30 кг стали и 0,75 кг ферросилиция Si75 на 1 т чугуна.

Таблица 12

Элементы	Метод определения	Продолжительность определения, мин	Точность определения, %
C	Сжиганием	8	±0,05
Si	Весовой	90	±0,05
Mn	Персульфатно-серебряный	15	±0,025
S	Сжиганием	5	±0,004
P	Фотоколлометрический	20	±0,01
Ni	Тот же	20	±0,07
Cr	Объемный	35	±0,02
Mo	Тот же	30	±0,01
Si, Mn, Ni, Cr	Спектрограф ИСП-30, метод твердого графика с фотографической регистрацией спектра	20	±0,01
То же	Стилоскоп Сл-11А	4	±0,10

Для выявления погрешности при определении химического состава чугуна спектральными методами относительно химических было проведено 38 анализов различных составов чугуна. Из результатов исследования, приведенных в табл. 13, можно сделать заключение, что для экспресс-анализа состава металла при плавке в индукционных печах целесообразно использовать следующие методы: для контроля углерода — метод сжигания, точность ±0,05 %; для контроля серы и фосфора — химический анализ, точность ±0,01 %; для контроля кремния, марганца, хрома, никеля и молибдена — спектрографический метод, точность ±0,1 %.

Для окончательного определения состава металла и выдачи сертификата на него рекомендуется химическими методами проводить анализ углерода, фосфора и серы, остальные элементы определять спектрографическим методом.

Техника безопасности при электроплавке чугуна. При эксплуатации электроплавильного оборудования необходимо соблюдение определенных мер предосторожности, связанных с наличием высокого напряжения и открытой поверхности жидкого металла.

Т а б л и ц а 13

Элементы	Среднее значение концентрации, полученное химическим методом, %	Значение ошибки определения, %	
		Спектрографический анализ	Стилоскопический анализ
Si	1,92	$\begin{array}{c} +0,11 \\ -0,12 \end{array}$	$\begin{array}{c} +0,17 \\ -0,15 \end{array}$
Mn	0,61	$\begin{array}{c} +0,06 \\ -0,08 \end{array}$	$\begin{array}{c} +0,13 \\ -0,09 \end{array}$
Cr	0,30	$\begin{array}{c} +0,13 \\ -0,09 \end{array}$	—
Ni	0,37	$\begin{array}{c} +0,17 \\ -0,06 \end{array}$	—

Индуктор печи должен быть закрыт со всех сторон изолирующими прокладками, исключающими возможность случайного внешнего контакта. Токоподводящие кабели и шины также необходимо перекрывать изолирующими материалами. Рабочий инструмент плавильщика (ломик, ложка для отбора проб, скребок для удаления шлака и т. п.) должен быть снабжен изолирующими ручками, особенно при работе на печах высокой частоты. Перед ведением плавки нужно проверить исправность схемы сигнализатора целости футеровки и контроля индуктора.

Следует проверять также отсутствие течи в гидравлической системе поворота печи, применять для ее заполнения невоспламеняющееся масло. Насосы гидравлической системы должны располагаться на достаточном удалении от печей или иметь хорошую защиту.

Особенно тщательно надо следить за исправностью и непрерывной работой водяного охлаждения индуктора. В случае прекращения подачи воды в индуктор печь немедленно выключается, при необходимости индуктор охлаждается сжатым воздухом.

Качество футеровки контролируется с помощью сигнализатора, а в тигельных печах обязательно еще проводится и внешний осмотр в начале каждого цикла работы. Не следует допускать образования мостов из твердых шихтовых материалов над ванной жидкого металла, приводящих к неконтролируемому местному перегреву и разрушению футеровки. Это особенно опасно при переплавке стружки. Для сохранения футеровки и предупреждения прорыва жидкого металла к индуктору нельзя подвергать футеровку резким термическим ударам, механическому повреждению при загрузке шихты, поворотам и сотрясению в холодном состоянии. Быстрое повышение температуры металла может быть вызвано добавлением в чугун легирующих компонентов, экзотермических смесей; охлаждение — присадкой большого количества холодной шихты, науглероживателя и т. п. При добавлении в жидкий металл холодных кусков шихты возможен выброс металла. Особенно опасна загрузка влажной шихты, со льдом, снегом или маслом (поэтому нежелательно производить переплавку брикетированной стружки), так как при этом наблюдаются сильные взрывы, фонтанирование и выбросы жидкого металла. Нужно обеспечивать загрузку только сухой и чистой шихты, применять для заполнения печи желобы, склизы, бадьи закрытого типа с тем, чтобы не было необходимости плавильщику непосредственно участвовать в загрузке материалов. Поскольку при переплавке некачественных шихтовых материалов образуется большое количество газов, дыма, каждая плавильная печь должна иметь вентиляционное устройство.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЛАВКИ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА

Условия индукционной плавки чугуна в тигельных печах весьма благоприятны для получения качественного металла. Плавление и перегрев металла осуществляются бесконтактным способом, отсутствует загрязнение расплава газовой атмосферой или раскаленным коксом, как это имеет место в вагранках или пламенных печах. Вследствие высокого коэффициента полезного действия индукционных печей время плавки сравнительно меньше. Возможна точная регулировка температуры жидкого металла и, что особенно важно, длительная выдержка и высокий перегрев расплава. Рабочий процесс может быть как дискретным, так и непрерывным. Металл контактирует только с футеровкой и атмосферой, причем реакции с футеровкой могут регулироваться подбором состава футеровки и металла, температурного режима, а реакции с атмосферой сведены к минимуму наведением шлаков.

Шлаки из-за низкой температуры практически не реакционны. В индукционных печах можно получить чугун любого состава, однако в печах промышленной частоты изменение марки чугуна затруднено вследствие необходимости постоянно иметь в печи пусковой объем металла («болото»). Интенсивное электромагнитное перемешивание расплава в печах промышленной частоты обуславливает специфические достоинства и недостатки этих агрегатов. Возможна обработка расплава порошками, жидким шлаком. При этом улучшается усвоение и однородность распределения легирующих добавок, но усиливается взаимодействие с атмосферой, футеровкой. В зависимости от интенсивности перемешивания могут возникать различные условия протекания металлургических реакций. При очень сильном перемешивании (10—16%) практически невозможно предотвратить воздействие на металл кислорода и влаги воздуха. Шлаковые частицы на-

ходятся в расплаве, футеровка сильно размывается. При перемешивании средней интенсивности (5—10%) жидкие шлаки остаются на поверхности расплава, мелкие твердые частицы находятся в расплаве. При слабом перемешивании шлаки находятся на поверхности расплава и служат защитой от воздействия атмосферы.

1. НАУГЛЕРОЖИВАНИЕ ЖИДКОГО СПЛАВА В ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Физико-химическая сущность процесса науглероживания. Науглероживание расплавленного металла — один из важнейших процессов плавки синтетического чугуна, которому посвящено большое число экспериментальных исследований. Особенно подробно изучалось науглероживание при ваграночной плавке, для условий протекания капли жидкого металла через слой раскаленного кокса, с привлечением теории конвективной диффузии. В индукционных печах частицы науглероживателя окружены жидким расплавом, который интенсивно перемешивается. В этом случае расплав служит источником тепла для частиц науглероживателя. Экспериментальные данные свидетельствуют о значительном изменении количественных зависимостей процесса науглероживания в индукционных печах промышленной частоты по сравнению с высокочастотными печами и тем более с вагранками, хотя принципиальное влияние основных факторов, естественно, сохраняется. Было обнаружено, что в ваграночном процессе колебания содержания углерода в выплавляемом чугуне происходят более плавно, чем в низкочастотной печи, что объясняется гораздо большей вариативностью условий плавки синтетического чугуна. Поэтому невнимательное отношение к проведению технологической операции науглероживания при выплавке синтетического чугуна обычно обуславливает получение некондиционного металла.

Растворение графита в жидком железе по сложившимся представлениям происходит в несколько этапов: отрыв плоских пакетов графита от поверхности твердой частицы и растворение пакетов, диффузия углерода в расплаве [3, 8, 64]. Полагают, что растворение графита в железе осуществляется путем внедрения атомов железа в межба-

зисные плоскости. Дальнейшее растворение графита зависит от температуры и времени.

Результаты исследования структурно-чувствительных свойств железоуглеродистых сплавов показали, что при растворении углерода развиваются два противоположных

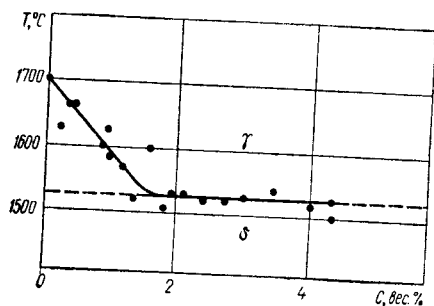


Рис. 24. Влияние концентрации углерода на температуру изменения структуры ближнего порядка.

процесса: выделение микрогруппировок углерода и увеличение межатомных расстояний [9—14]. Это подтверждается непрерывным увеличением электросопротивления расплавов, изменением плотности, магнитной восприимчивости и вязкости по мере увеличения концентрации углерода. Политермы плотности сплавов железо—углерод имеют точку перегиба, положение которой изменяется с концентрацией углерода (рис. 24 [15]). Очевидно, этот факт характеризует влияние углерода на температуру перехода от одного типа структуры ближнего порядка γ к другому δ . Имеется в виду не фазовый переход, а изменение упаковки существующих группировок, находящихся в динамическом равновесии со средой. Наличие гистерезиса вязкости и электросопротивления в сплавах типа металл—углерод также свидетельствует о наличии в них микрогруппировок углерода [30, 52—54]. Различают динамическую микронеоднородность — присутствие короткоживущих, но постоянно имеющих группировок атомов, время жизни которых соизмеримо с временем релаксации, и коллоидную микронеоднородность — когда диспергированная фаза существует достаточно длительное время, постепенно растворяясь в дисперсионной среде.

Результаты электронномикроскопических исследований показали, что размер участков микрогетерогенности в твердых растворах равен 10^{-6} — 10^{-7} см. На этом основании железоуглеродистые расплавы относят к системам с коллоидной микронеоднородностью.

Согласно другим представлениям в расплаве могут находиться как отдельные ионы углерода, так и плоские макромолекулы (пинакоиды). Однако пинакоиды не являются обособленной фазой — они отдают четвертый валентный электрон в электронный газ металлического расплава, образуя таким образом макроионы. В результате получается истинный, а не коллоидный раствор [27]. Эти точки зрения не противоречат фактам. Для расплавов железо — углерод эффекты, связанные с появлением неоднородности, наблюдаются при концентрации углерода свыше 2%; для системы железо — углерод — кремний (2% кремния) они имеют место уже при содержаниях углерода свыше 1,5%. Состояние углерода в расплаве сильно зависит от степени перегрева чугуна над линией ликвидуса. Предполагаются также области существования различных агрегатных состояний углерода в жидких чугунах. В расплавах, имеющих температуру на 100°C и выше температуры ликвидуса углерод находится в растворе и частично в форме полиатомарного состояния. Ближе к температуре ликвидуса возможны дисперсные образования графита из гексагональных колец (пинакоиды).

Превращение турбостратного графита в трехмерные кристаллы графита начинается, как показал рентгеновский анализ, при достижении среднего диаметра образования 100 \AA . Следовательно, при 1300 — 1400°C в жидкости могут находиться частицы размером того же порядка.

Графитовые образования (10 — 100 \AA), возникающие над линией ликвидуса в доэвтектических чугунах, обладают развитой поверхностью, а свойства такой системы (жидкость + дисперсные образования) зависят от свойств и размеров входящих в нее поверхностей раздела. Известно, что магнитная восприимчивость, электропроводность, плотность, акустические свойства расплава и т. п. зависят от степени его перегрева над линией ликвидуса. Пинакоиды графита являются устойчивыми образованиями. Выдержка при 1700°C не устраняет полностью микронеоднородность расплава. Таким образом, микрогетерогенность расплавов чугуна имеет «наследственное» происхождение, связанное с неполным растворением углерода в процессе плавки. На основании экспериментальных данных можно предположить, что дисперсные выделения графита начинаются выше температуры ликвидуса.

При переходе линии ликвидуса (область твердо-жидкого состояния) этот процесс сопровождается и маскируется кристаллизацией аустенита.

Рассмотрим условия науглероживания сплава при электромагнитном перемешивании в индукционных печах. Процесс науглероживания при этом ускоряется, что обусловлено большой удельной поверхностью контакта и высоким значением коэффициента массообмена между установившимся турбулентным потоком расплава и частицами науглероживателя. Скорость науглероживания зависит от интенсивности перемешивания, температуры и химического состава жидкого металла, вида науглероживающего реагента и его свойств, технологического режима науглероживания.

Исследуем одномерный поток двухфазной среды: жидкий металл — частицы науглероживателя. Принимая поток бесконечным, пренебрегаем изменением гидромагнитных параметров по координате и во времени, так как поток вынужденный.

Учитывая взаимодействие фаз, поверхностные явления и физическое состояние углерода в жидком металле, можно представить науглероживание совокупностью нескольких процессов: конвективного массопереноса в объеме жидкого металла; отрыва блоков углерода от поверхности частиц науглероживателя; диффузионного переноса углерода в пограничном слое жидкого стального сплава и в объеме жидкого металла.

Очевидно, что создание равновесной концентрации углерода в объеме жидкого металла определяется не столько природой науглероживателя, сколько интенсивностью протекания отдельных процессов. Если допустить, что распределение потоков жидкого металла соответствует результирующему действию электромагнитных и тепловых полей, движение жидкого металла внутри пограничного слоя пренебрежимо мало и что химические процессы между частицами науглероживателя и жидким металлом отсутствуют, то пользуясь методикой Н. Зубера [28], можно записать момент переноса потока p как сумму моментов переноса жидкого металла p_1 и частиц науглероживателя p_2 :

$$p = p_1 + p_2 = (1 - C) v_1 + C v_2, \quad (12)$$

где v_1 — средняя скорость движения жидкого металла, м/сек; v_2 — средняя скорость движения частиц науглеро-

живателя, м/сек; C — весовая концентрация науглероживателя, доли.

Взаимные диффузионные скорости составляющих потока будут:

$$u_1 = v_1 - p = C(v_1 - v_2); \quad (13)$$

$$u_2 = v_2 - p = (1 - C)(v_2 - v_1). \quad (14)$$

Из уравнений неразрывности двух фаз

$$\frac{\partial(1 - C)}{\partial \tau} + \frac{\partial[(1 - C)v_1]}{\partial x} = 0 \quad (15)$$

$$\text{и} \quad \frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial(Cv_2)}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

можно получить

$$\frac{\partial[(1 - C)v_1 + Cv_2]}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

или

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0.$$

Другими словами, момент переноса потока не зависит от координаты, а является только функцией времени. Преобразуем уравнение для твердой фазы (16):

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial[C(u_2 + p)]}{\partial x} = 0.$$

Поскольку $\frac{dp}{dx} = 0$, то

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + p \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial(Cu_2)}{\partial x} = 0$$

или

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \left[p + \frac{\partial(Cu_2)}{\partial C} \right] \frac{\partial C}{\partial x} = 0.$$

Обозначим выражение $\left[p + \frac{\partial(Cu_2)}{\partial C} \right]$ через A . Тогда

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + A \frac{\partial C}{\partial x} = 0. \quad (18)$$

Из сравнения уравнения (18) с уравнением диффузии углерода в пограничном слое жидкого металла

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + B \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

видно, что они подобны и отличаются только скоростными параметрами A и B :

$$A = (1 - C)v_2 - Cv_1; \quad B = D \frac{\Theta}{V},$$

где D — коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{сек}$; Θ — площадь контакта, м^2 ; V — объем контактирующего расплава, м^3 .

Предположим, что $A < B$. Тогда

$$D > \frac{1}{\Theta} [(1 - C)v_2V + Cv_1V]. \quad (20)$$

Первая часть неравенства (21) представляет собой количество движения фаз на единичной площади контакта при обратных концентрациях углерода в жидком металле и науглероживателя, что не меняет физическую картину процесса. Изменение количества движения равно импульсу силы внутреннего трения:

$$F_{\text{тр}} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x}, \quad (21)$$

где η — динамическая вязкость, $\text{н} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$.

Число Шмидта, характеризующее внутренние свойства системы как отношение конвективного и диффузионного переносов массы, для железоуглеродистых сплавов больше единицы во всей области температур жидкого состояния, характерного для литейного производства:

$$Sc = \frac{\eta}{\rho D} > 1, \quad (22)$$

где ρ — плотность гетерогенной системы.

Из соотношений (20) — (22) заключаем, что количество движения по абсолютной величине не может быть меньше коэффициента диффузии, следовательно, имеет место обратное соотношение $A > B$. Другими словами, диффузионный перенос углерода в пограничном слое совершается медленнее, чем его конвективный перенос в объеме.

Известно, что процесс отрыва блоков углерода от поверхности частиц науглероживателя протекает быстрее, чем диффузия в пограничном слое жидкого металла. Таким образом, процесс науглероживания жидкого металла определяется скоростью диффузионного переноса углерода в пограничном слое жидкой фазы.

На толщину пограничного слоя решающее влияние оказывает относительная скорость фаз. В общем случае толщина гидродинамического пограничного слоя β не равна толщине диффузионного пограничного слоя. Поскольку число Шмидта больше единицы, толщина диффузионного пограничного слоя меньше гидродинамического. Следовательно, диффузионный перенос углерода происходит главным образом в слое, толщина которого равна толщине гидродинамического пограничного слоя [58]:

$$\beta = \left(\frac{v}{\omega} \right)^{0.5} [\text{м}], \quad (23)$$

где v — кинетическая вязкость жидкой фазы, $\text{м}^2/\text{сек}$; ω — угловая скорость жидкой фазы относительно частиц науглероживателя, пропорциональная приложенному к металлу вращающему моменту, который, в свою очередь, пропорционален квадрату напряженности электромагнитного поля индуктора.

Исходя из этого, можно записать:

$$\beta = b \frac{v^{0.5}}{H}, \quad (24)$$

где b — размерный коэффициент, $\text{а}/\text{мсек}$; H — напряженность электромагнитного поля, $\text{а}/\text{м}$.

Для определения скорости науглероживания жидкой фазы в уравнении (19) заменим

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{C_n - C}{\beta}, \quad (25)$$

где C_n — концентрация насыщения на поверхности контакта.

Тогда величина скорости переноса углерода

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{B}{\beta} (C_n - C) = k_1 (C_n - C).$$

Одновременно с насыщением углеродом жидкого металла происходит его выгорание, обусловленное взаимодействием с кислородом атмосферы, растворенным кислородом и окислами металла. Скорость выгорания лимитируется диффузией кислорода к поверхности контакта и в данном случае не зависит от концентрации углерода в металле ($C > C_{\text{кр}}$). При установленном режиме скорость выгорания — величина постоянная.

Выражение для полной скорости науглероживания будет иметь вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = k_1 (C_n - C) - R. \quad (26)$$

После интегрирования от 0 до τ и от C_0 до C получаем

$$C = \left(C_n - \frac{R}{k_1} \right) - \left[\left(C_n - \frac{R}{k_1} \right) - C_0 \right] \exp[-k_1 \tau]. \quad (27)$$

Преобразуем полученную формулу. При $\tau = \infty$

$$C_n - C = \frac{R}{k_1}.$$

Эта величина не что иное, как вызываемая угаром разница между расчетной величиной концентрации насыщения и действительной концентрацией. Обозначим величину достижимой концентрации насыщения

$$C_d = C_n - \frac{R}{k_1}.$$

Тогда уравнение (25) примет вид

$$C = C_d - \exp[-k_1 \tau] (C_d - C_0). \quad (28)$$

Принимая $\exp[-k_1 \tau] = K$, получаем

$$C = C_d - K (C_d - C_0). \quad (29)$$

Таким образом, формула (25) приведена к виду известного уравнения, описывающего растворение вещества при отсутствии химического взаимодействия с растворителем. Такое соответствие свидетельствует о достоверности выводов, поскольку в основе процесса науглероживания лежит диффузионный перенос реагента. Однако между этими формулами есть и глубокое различие, заключающееся в том, что текущая концентрация углерода в жидком металле является функцией электромагнитного перемешивания. Причем эта зависимость существенно влияет на величину концентрации углерода. Взаимосвязь процесса науглероживания и перемешивания жидкого металла характеризуется коэффициентом K формулы (29).

Электромагнитным перемешиванием жидкого металла в индукционных электропечах промышленной частоты

можно регулировать скорость науглероживания стального сплава, а также выравнивать температуру сплава и концентрацию углерода по всему объему жидкого металла. Благодаря этому стало возможным выплавлять синтетический чугун в промышленном масштабе, использовать в качестве шихты легковесный стальной скрап.

Если бы значения коэффициентов теплопроводности жидкого сплава и диффузии углерода были бесконечно велики, то не возникало бы неравномерности состава и температуры. В действительности значения этих коэффициентов малы по абсолютной величине. В условиях термодинамической неравновесности системы достигнуть совершенного выравнивания температуры и концентрации невозможно, однако можно увеличить скорость выравнивания посредством конвективного массопереноса. Электромагнитное перемешивание жидкого металла в печах промышленной частоты служит мощным ускорителем физико-химических процессов.

Анализ основного уравнения науглероживания жидкого металла. Процесс науглероживания будет идти тем быстрее, чем меньше значение коэффициента K в уравнении (29):

$$K = \exp \left[- \frac{D}{b\nu^{0.5}} \cdot \frac{\Theta}{V} H \tau \right]. \quad (30)$$

Легко видеть, что в каждый момент времени коэффициент K является, в частности, функцией температуры металла. Науглероживание жидкого металла будет идти тем быстрее, чем выше его температура, чем больше поверхность контакта, т. е. чем более дисперсны частицы науглероживания, и чем меньше вязкость металла. Одновременно коэффициент K является функцией напряженности электромагнитного поля индуктора H (рис. 25, а), т. е. интенсивности перемешивания.

Соответственно, зависимость концентрации углерода от интенсивности электромагнитного перемешивания представится экспоненциальной функцией (рис. 25, б). Это указывает на то, что даже малая интенсивность перемешивания уже оказывает существенное влияние на скорость науглероживания жидкого сплава. Эффективность воздействия электромагнитного перемешивания на скорость процесса снижается по мере увеличения интенсивности перемешивания.

Из уравнения (29) найдем коэффициент

$$K = \frac{C_d - C}{C_d - C_0} \quad (31)$$

При изменении концентрации углерода в пределах от C_0 до C величина K принимает значения соответственно от 1 до 0. При фиксированном значении C коэффициент $K = \text{const}$, т. е.

$$\frac{D}{bv^{0.5}} \cdot \frac{\theta}{V} = \text{const} \quad (32)$$

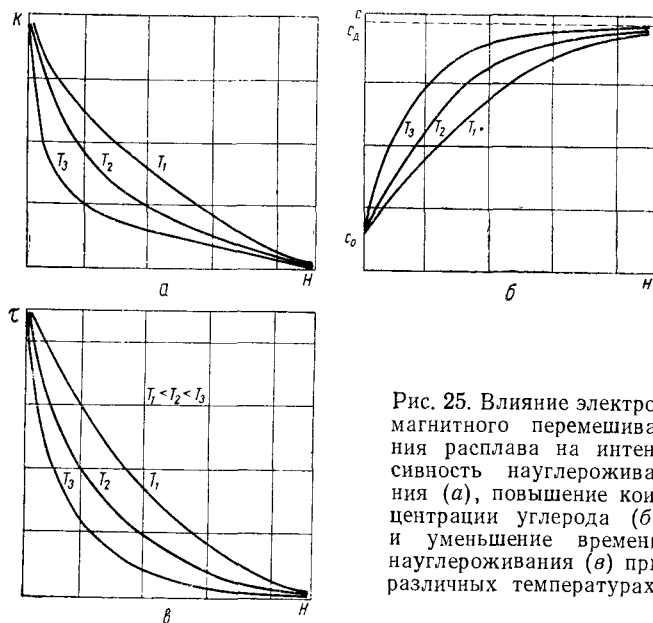


Рис. 25. Влияние электромагнитного перемешивания расплава на интенсивность науглероживания (а), повышение концентрации углерода (б) и уменьшение времени науглероживания (в) при различных температурах.

Из соотношения (32) следует, что время науглероживания при прочих равных условиях определяется энергетическим состоянием жидкого металла. Вместе с тем значение его обратно пропорционально напряженности электромагнитного поля (рис. 25, в).

Очевидно, что при увеличении интенсивности перемешивания за одно и то же время происходит более равномерное распределение углерода в жидкой фазе и в более дисперсной форме.

Из уравнения (29) найдем приращение концентрации углерода в металле:

$$\Delta C = C - C_0 = (1 - K)(C_d - C_0) \quad (33)$$

Выражение (34) является уравнением пучка прямых линий в координатах $\Delta C - C_0$ с центром пучка, расположенным на оси C_0 в точке с координатой C_d .

Угол наклона прямых линий определяется величиной коэффициента K :

$$\text{tg } \alpha = 1 - K \quad (34)$$

Поскольку коэффициент K — функция напряженности электромагнитного поля индуктора, можно сделать вывод, что при возрастании интенсивности перемешивания угол наклона прямых линий будет увеличиваться, пока концентрация углерода не достигнет предельной величины C_d , при которой $K=0$. Очевидно, приращение концентрации углерода будет зависеть также от свойства науглероживателя — размеров частиц, плотности, степени чистоты и т. д., что в свою очередь отразится на величине угла наклона прямых линий.

Таким образом, определенному режиму науглероживания жидкого стального сплава в индукционных печах промышленной частоты будет соответствовать определенная линия в координатах: начальная концентрация углерода — прирост концентрации углерода в жидком металле. Фактическое значение коэффициента науглероживания K , соответствующее имеющимся производственным условиям, определяется по результатам первых двух-трех плавов с использованием графической интерпретации формулы (33) (рис. 26).

При изменении условий плавки необходимо заново определять значение коэффициента K . Однако в литейном цехе обычно имеется всего несколько вариантов условий

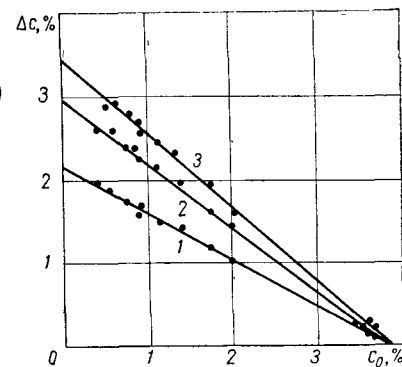


Рис. 26. Интенсивность науглероживания расплава при интенсивности перемешивания: 1 — $P=2\%$; 2 — $P=8\%$; 3 — $P=16\%$.

(различные шихтовые материалы, другой науглероживающий реагент и т. п.), для которых получены значения коэффициента науглероживания. Для индукционных печей промышленной частоты значение коэффициента науглероживания K изменяется в пределах 0,1—0,4.

Бóльшие значения коэффициента науглероживания соответствуют науглероживанию при слабом перемешивании.

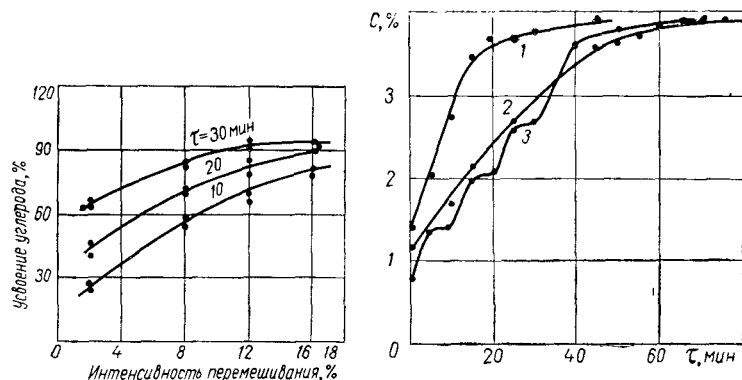


Рис. 27. Влияние перемешивания на усвоение углерода жидким металлом при постоянной величине добавки (τ — время отбора проб).

вании, применения реагента, загрязненного примесями; использовании окисленных шихтовых материалов и при низкой температуре жидкого металла.

Интенсивное перемешивание жидкого металла нивелирует различные условия науглероживания (рис. 27). Процент усвоения углерода реагента жидким металлом при возрастании интенсивности перемешивания увеличивается. Подобным образом в случае интенсивного перемешивания сглаживается различие между значениями скорости процесса науглероживания при применении разных науглероживающих реагентов, использовании исходного жидкого сплава с различным содержанием кремния и т. п.

Воздействие многих легко изменяющихся факторов определяет вариативность степени науглероживания. Из основного уравнения процесса науглероживания следует,

например, что науглероживание расплава будет тем сильнее, чем выше достижимая концентрация насыщения, т. е. чем меньше содержание в расплаве компонентов, уменьшающих растворимость углерода, и чем меньше его угар.

Диффузионная природа процесса науглероживания жидкого металла обуславливает экспоненциальный характер экспериментальных кривых (рис. 28). Науглероживание идет тем быстрее, чем выше температура металла, чем больше поверхность соприкосновения твердой и жидкой фаз, чем интенсивнее перемешивание. Растворение углерода при высокой интенсивности перемешивания (кривая 1) идет примерно в два раза быстрее, чем при низкой интенсивности перемешивания жидкого сплава (кривая 2).

Начиная с некоторого момента, когда процесс науглероживания ограничивается химической природой реакции, увеличение интенсивности перемешивания не дает эффекта. Практически этот момент наступает тогда, когда частицы науглероживателя полностью увлекаются потоком расплава в глубь ванны металла и распределяются в нем относительно равномерно. Дальнейшее усиление перемешивания не приносит пользы, наоборот, — отрицательно влияет на стойкость огнеупорной футеровки тигля печи.

Скорость растворения углерода при периодической загрузке науглероживателя и одинаковой интенсивности перемешивания (см. рис. 28, кривая 3) примерно постоянна и равна первоначальной скорости процесса почти до концентрации насыщения, когда скорость растворения реагента становится незначительной при любой интенсивности перемешивания. В связи с этим избыточное количество науглероживателя может существовать в виде макроскопических частиц неограниченное время. В отдельных объемах расплава, обогащенных углеродом, такие частицы могут быть обнаружены даже при невысокой общей концентрации углерода в расплаве.

Частицы науглероживателя были обнаружены на шлифах проб, полученных закалкой чугуна в воде из жидкого состояния. Таким же образом удалось наблюдать начало растворения — отрыв блоков углерода от частиц науглероживателя (рис. 29), что подтверждает

Рис. 28. Характер кривых науглероживания расплава при различной интенсивности перемешивания:

1, 3 — $P=16\%$; 2 — $P=2\%$.

принятую при теоретическом исследовании процесса гипотезу.

Влияние физико-химических свойств и способа загрузки реагента на процесс науглероживания. Для получения синтетического чугуна используются различные углеродсодержащие материалы: гранулированный уголь, аморф-

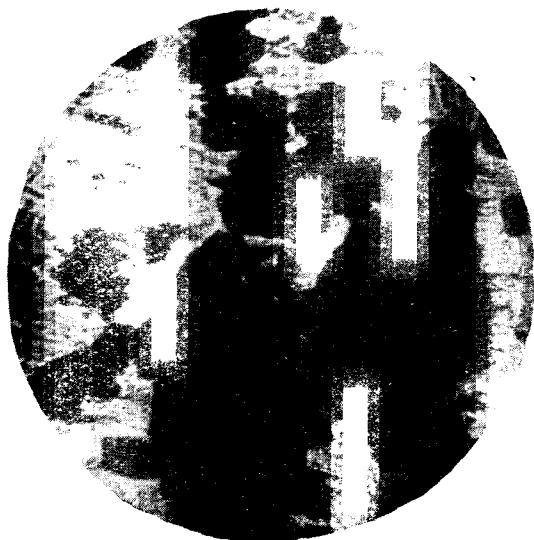


Рис. 29. Нерастворившиеся частицы науглероживателя ($\times 1500$).

ный графит, кокс, канальная сажа, электродный бой, нефтяной пек и другие карбюризаторы. Эффективность применения зависит от условий плавки, химического состава металла и других факторов, поэтому опубликованные данные по усвоению карбюризаторов различны и несопоставимы. Зависимость скорости и полноты усвоения углерода от вида реагента в большегрузных индукционных печах промышленной частоты изучалась с применением отечественных углеродсодержащих материалов (табл. 14, 15 и рис. 30). Во всех экспериментах поддерживалась высокая интенсивность перемешивания расплава.

Из приведенных данных видно, что степень насыщения жидкого металла углеродом тем выше, чем более чистый

Таблица 14

Карбюризатор	Содержание элементов, %		Содержание летучих веществ в горючей массе, %	Зольность, A_c , %	Содержание влаги, W_p , %
	C	Si			
Уголь донецкий	84,3	2,80	30,6	18,6	5,3
Древесный уголь	87,0	—	7,0	1,2	7,1
Кокс:					
литейный	95,9	1,00	2,1	12,5	5,5
металлургический	96,5	0,55	1,8	11,7	6,0
сланцевый	88,6	0,53	6,2	3,0	2,8
Термоантрацит:					
кусковой	97,6	0,90	1,6	8,8	3,0
отсев	95,8	1,40	2,5	9,6	5,8
Графит:					
аморфный	83,5	0,24	2,8	15,2	0,7
кристаллический	91,0	0,25	1,8	8,5	0,5
тигельный	91,5	0,03	1,1	2,2	0,5
Электродный бой 1	90,9	0,03	3,2	2,8	1,2
Электродный бой 2	97,0	0,03	—	1,2	0,5
Электродный порошок	92,8	0,03	2,9	2,3	3,2

Таблица 15

Карбюризатор	Температура расплава, $^{\circ}\text{C}$	Содержание элементов, %		Время науглероживания, мин	Усвоение углерода, %	Скорость усвоения углерода, $\%C/\text{мин}$
		C	Si			
Уголь донецкий	1510	2,98	1,40	24	60	0,063
Уголь древесный	1500	3,71	1,49	27	60	0,080
Кокс:						
литейный	1490	3,22	1,31	26	70	0,070
металлургический	1530	3,38	1,51	23	75	0,080
сланцевый	1510	3,52	1,57	22	80	0,086
Термоантрацит:						
кусковой	1540	3,44	1,43	30	78	0,067
отсев	1520	3,41	1,50	26	76	0,073
Графит:						
аморфный	1510	3,40	1,54	19	75	0,091
кристаллический	1530	3,43	1,50	23	77	0,083
тигельный	1550	3,56	1,28	20	85,4	0,093
Электродный бой 1	1520	3,79	1,79	19	90	0,100
Электродный бой 2	1530	3,86	1,32	22	95,1	0,132
Электродный порошок	1540	3,83	1,46	27	93	0,120

по химическому составу реагент, чем меньше его зольность (рис. 31, а). Это явление — общее для всех исследований, так как диффузионное растворение углерода реагентов присуще для всех применяемых материалов, атомная природа которых едина. Присутствие примесей в углеродном материале не только снижает содержание углерода во введенном реагенте, но изменяет также значение коэффициента диффузии углерода в жидком металле. Исключение из общей

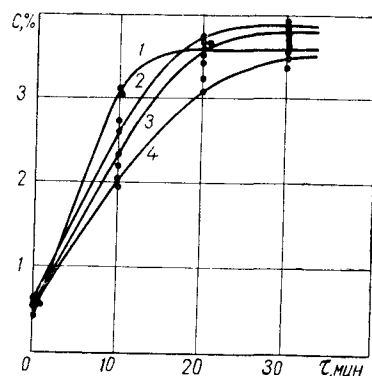


Рис. 30. Характер растворения науглероживающих реагентов:

1 — графит тигельный; 2 — электродный бой; 3 — электродный порошок; 4 — кокс сланцевый.

закономерности составляют термически обработанные карбюризаторы (металлургический кокс и термоантрацит), имеющие высокую механическую прочность и низкую реакционную способность (рис. 31, точки 3). Эти же карбюризаторы имеют относительно низкую скорость усвоения углерода (рис. 31, б). Таким образом, необходимо учитывать не только основной фактор качества науглероживателя — его чистоту, но и другие физико-меха-

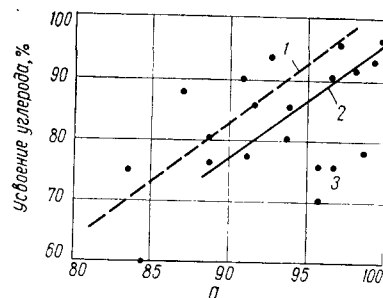


Рис. 31. Влияние чистоты карбюризатора на степень (а) и скорость (б) усвоения С в индукционных печах промышленной (1) и высокой частоты (2). Точки 3 — кокс и термоантрацит.

нические свойства, влияющие на растворение реагента в жидком сплаве.

Электромагнитное перемешивание жидкого металла в печах промышленной частоты обеспечивает конвективный массоперенос на границе раздела твердой и жидкой фаз, создавая в течение всего процесса высокий градиент концентрации углерода. Диффузия углерода, будучи пропорциональна градиенту концентрации, усиливается. В конечном итоге усвоение углерода любого реагента жидким металлом в индукционных печах промышленной частоты выше (почти полное), чем в высокочастотных печах. В то же время усвоение углерода реагента без перемешивания жидкого металла сильно зависит от его концентрации в реагенте: с понижением удельного содержания углерода процент его усвоения уменьшается. Это обстоятельство может быть объяснено увеличением времени процесса науглероживания в печах без перемешивания жидкого металла и, как следствие, значительным окислением углерода на поверхности жидкого металла.

Определенное влияние на процесс науглероживания оказывает и величина частиц науглероживающих реагентов. Мелкие частицы и пылевидная фракция подвержены уносу конвективными потоками воздуха и быстрому окислению, крупные частицы растворяются в металле длительное время. Влияние размера частиц науглероживателя обусловлено изменением величины реакционной поверхности гетерогенной системы жидкий металл — реагент. В общем случае оптимальная величина частиц науглероживателя зависит от объема жидкого металла и интенсивности перемешивания. Для промышленных индукционных установок наиболее технологичным и эффективным из испытанных материалов оказался электродный порошок с размерами частиц 5—10 мм. Для практических расчетов следует принимать степень его усвоения 90%. Однородный по величине частиц науглероживающий реагент позволяет получить устойчивый режим науглероживания и стабильные результаты.

Большое значение имеет способ загрузки науглероживателя, на выбор которого влияют размеры печи, частота тока, режим загрузки шихтовых материалов. Для высокочастотных печей небольшой емкости целесообразно науглероживатель вводить в печь целиком вместе с холодной

Таблица 16

шихтой, так как при этом достигается высокая степень усвоения углерода. При последовательном введении углерода с шихтой в печь с «болотом» или на зеркало полной ванны металла расход электроэнергии и время плавки увеличиваются почти в 1,5 раза, а усвоение углерода уменьшается на 15—20% [19, 36].

Сравнением режима науглероживания в печах промышленной частоты при одновременной загрузке порции науглероживателя и шихты на зеркало ванны жидкого металла в процессе плавки и режима науглероживания после расплавления всей шихты установлено, что расход электроэнергии и продолжительность плавки во втором случае больше. При режиме науглероживания в конце плавки наблюдается значительное изменение концентрации углерода в жидкой фазе, продолжительность доводки по химическому составу составляет около 25 мин и сопровождается снижением температуры на 50—70°С на 1% усвоенного углерода в зависимости от подводимой удельной мощности печи промышленной частоты.

Плавка с периодическим добавлением науглероживателя характеризуется более ровным ходом печи. Анализ результатов выплавки чугунов с различными режимами науглероживания (табл. 16) показывает, что периодическое добавление науглероживателя (I серия плавок) сокращает продолжительность плавки в среднем на 5 мин и снижает расход электроэнергии на 38 кВт·ч на тонну выплавляемого чугуна.

Таким образом, режим периодической загрузки науглероживателя на зеркало жидкого металла одновременно с порцией шихты в печах промышленной частоты более экономичен и способствует ровному температурному ходу плавки. Однако при этом необходимо отметить значительно больший угар углерода и меньшее усвоение его металлом, а следовательно, более низкую конечную концентрацию (3,71% против 3,85% углерода при загрузке реагента после расплавления всей шихты).

Влияние температуры жидкого металла на процесс науглероживания. Величина достижимой концентрации насыщения жидкого железа углеродом зависит от температуры. Согласно исследованиям Чипмана эта зависимость имеет линейный характер:

$$\%C = 1,34 + 2,54 \cdot 10^{-3} T^{\circ}C. \quad (35)$$

Серия плавок	Номер плавки	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	Продолжительность плавки, мин/т	Содержание углерода, %
I	1	—	39,4	3,68
	2	570	29,8	3,65
	3	550	28,0	3,71
	4	560	31,0	3,80
	5	545	32,5	3,64
	6	530	29,4	3,73
	7	545	32,6	3,75
В среднем		560	33,1	3,71
II	1	620	42,0	3,60
	2	560	36,0	3,73
	3	—	46,2	3,93
	4	620	36,4	3,93
	5	580	36,0	3,80
	6	615	33,1	3,90
	7	595	37,6	3,95
В среднем		598	38,2	3,85

Позже такой характер зависимости подтвердил Шенк:

$$\%C = 1,30 + 2,57 \cdot 10^{-3} T^{\circ}C. \quad (36)$$

Температурная зависимость предельной растворимости углерода в жидком железе в первом приближении (без учета химического состава и угара) позволяет определить величину фактически достижимой концентрации углерода C_d из основного уравнения процесса науглероживания (30). Скорость растворения реагента также зависит от температуры жидкого металла, поскольку изменение температуры прямо влияет на величину коэффициента диффузии. Результаты измерений показывают, что при повышении температуры от 1550 до 1650°С значение коэффициента диффузии углерода в чистом железе возрастает от $2,5 \cdot 10^{-4}$ до $6,0 \cdot 10^{-4}$ см²/сек [64], т. е. влияние температуры на коэффициент диффузии весьма существенно.

Практически важно определить технологически легко осуществимый температурный интервал науглероживания, в котором скорость процесса будет достаточно высокой. Температурная зависимость растворения науглероживающего реагента для промышленных индукционных установок изучалась с применением в качестве реагента электродного порошка (рис. 32). Порошок вводился на зеркало жидкого металла при одинаковой интенсивности перемешивания для всех плавок. По мере растворения реагента наблюдалось снижение температуры жидкого металла, поскольку процесс идет со значительным поглощением тепла. В жидком железе теплота растворения углерода отрицательна: -6500 кал/г-атом . Снижение температуры расплава приближает систему к температуре ликвидуса, расплав становится вяз-

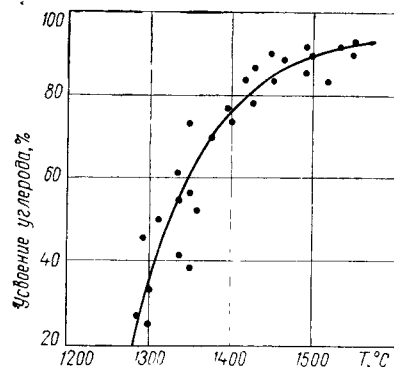


Рис. 32. Политерма растворения электродного порошка в железоуглеродистом сплаве при постоянной интенсивности перемешивания.

ким. Скорость науглероживания при этом уменьшается. При работе печи с высокой удельной мощностью (175—200 кВт/т) падение температуры вообще не улавливается, так как скорость повышения температуры в ванне за счет наведенной мощности компенсирует ее снижение при растворении углерода. Поэтому, чтобы ускорить растворение реагента и компенсировать падение температуры расплава, рекомендуется в период науглероживания расплава включать печь на режим интенсивного нагрева жидкого металла.

Необходимо отметить, что процесс науглероживания протекает при непрерывно изменяющейся температуре жидкого металла. Из рассмотрения экспериментальных данных по влиянию температуры на процент усвоения углерода реагента следует, что первоначальная температура жидкого металла в печах промышленной частоты должна быть не ниже 1450°C . Эта температура техно-

логически легко достижима. Снижение первоначальной температуры жидкого металла резко уменьшает скорость растворения углерода. Кривая температурной зависимости, приведенная на рис. 32, описывается формулой

$$\ln (\% \text{C}) = -\frac{8866,5}{T} + 4,5. \quad (37)$$

Как следовало ожидать, зависимость усвоения углерода от температуры выражается экспоненциальной функцией, что обусловлено диффузионной природой процесса. С понижением температуры жидкого сплава значение функции быстро уменьшается. Поскольку углерод в жидком сплаве усваивается поэтапно с диспергированием на частицы порядка 100 \AA и дальнейшим растворением, то для такой гетерогенной системы необходимо проводить термическую обработку расплава, позволяющую сознательно регулировать размеры частиц и свойства диспергированной фазы. Степень перегрева чугуна, продолжительность выдержки при этой температуре и химический состав сплава должны находиться при этом во взаимной связи. По терминологии Д. П. Иванова такая обработка синтетического чугуна называется термовременной. Она является средством формирования свойств и природы расплава, влияющих в дальнейшем на качество выплавляемого металла.

Зависимость процесса науглероживания от химического состава жидкого металла. Параметры процесса науглероживания в различной степени изменяются при введении в жидкий стальной сплав кремния, марганца, серы и других элементов. Для учета влияния элементов на растворимость углерода в тройных сплавах рекомендуется общепринятая формула:

$$\Delta x_{\text{C}}^{\text{Me}} = a x_{\text{Me}}, \quad (38)$$

где $\Delta x_{\text{C}}^{\text{Me}}$ — разность между концентрациями насыщения углерода в сплаве железо — металл — углерод и железо — углерод, ат. доли; $a x_{\text{Me}}$ — атомная доля металла в жидком сплаве.

При невысоких концентрациях присутствующего в сплаве элемента коэффициент a имеет постоянную величину. На этом основании предложена формула для опре-

деления растворимости углерода в тройных сплавах железа [5]:

$$\%C = \%C_{Fe-C} + \Delta C_0 x, \quad (39)$$

где $\%x$ — весовая концентрация присутствующего элемента; $\Delta C = m$ — величина изменения растворимости углерода при добавлении в жидкий железоуглеродистый сплав 1% легирующего элемента.

Исходя из предположения об аддитивности влияния отдельных компонентов чугуна при малых концентрациях ($0 < x < 3$), что подтверждается исследованиями работы [89], по формулам (36) и (39) определим достижимую концентрацию насыщения следующим образом:

$$\%C = 1,30 + 2,57 \cdot 10^{-3} T + \sum_{i=1}^n m_i x_i, \quad (40)$$

где $\sum_{i=1}^n m_i x_i$ — сумма поправок величины концентрации насыщения сплава углеродом по каждому из присутствующих элементов; T — температура расплава.

Экспериментально и теоретически на основе учета энергий смешения элементов с железом и углеродом были получены характеристики растворения углерода в сплавах железа с марганцем, кремнием, серой, фосфором, кобальтом, никелем, молибденом, ванадием, мелью, оловом, алюминием, титаном [6]. Поскольку растворение — это электронный процесс, то элементы, отдающие свои электроны в недостроенную $3d$ оболочку железа, уменьшают растворимость углерода. Поэтому все элементы четвертого периода, стоящие левее железа, уменьшают растворимость углерода. Элементы третьего периода также уменьшают растворимость углерода, однако зависимость здесь сложнее, так как необходимо учитывать характер взаимодействия элементов с железом. Элементы третьего и четвертого периодов, стремясь окружить себя атомами железа и вытесняя углерод, повышают активность углерода. Элементы, взаимодействующие с углеродом сильнее, чем железо, понижают активность углерода. Установлена зависимость растворимости углерода в сплавах на основе железа от порядкового номера третьего элемента в таблице Д. И. Менделеева. Экспериментально также доказано, что разность между атомной долей углерода в насыщенном им тройном сплаве

железо — металл — углерод и атомной долей в двойном сплаве железо — углерод слабо зависит от температуры и является линейной функцией от концентрации третьего элемента, если последняя невелика. Подобная зависимость может быть выведена также из теории регулярных растворов [67]. Разность между атомной долей углерода в тройном и двойном сплаве прямо пропорциональна концентрации насыщения углеродом в двойном сплаве и обратно пропорциональна температуре сплава. Поэтому увеличение концентрации насыщения углеродом в двойном сплаве компенсирует рост знаменателя. Вследствие этого изменение растворимости углерода от концентрации компонентов сплава практически не зависит от температуры, и данные о влиянии элементов на растворимость углерода (рис. 33) могут быть использованы для любых температур металлургических процессов.

Коэффициент m_i имеет значения, отрицательные для кремния ($-0,31$), фосфора ($-0,37$), серы ($-0,22$), меди ($-0,11$) и положительные для марганца ($+0,03$), хрома ($+0,075$), титана ($+0,15$) и ванадия ($+0,10$).

Сумма поправок величины концентрации насыщения сплава углеродом без учета концентрации кремния примерно постоянна и для средних содержаний присутствующих в синтетическом чугуне элементов составляет $-0,03\%$.

Расчетные величины достижимой концентрации углерода для различных температур и концентраций кремния с учетом присутствующих в чугуне элементов представлены в табл. 17. Используя эти данные и экспериментально найденное значение коэффициента K , по основному уравнению науглероживания (29) можно определить

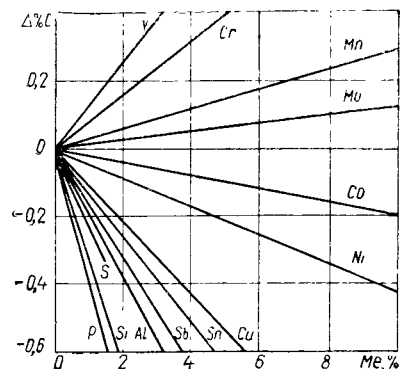


Рис. 33. Влияние добавляемых элементов на растворимость углерода в жидком железе.

концентрацию углерода в синтетическом чугуна. Так, при температуре 1400°С, концентрации в исходном жидком сплаве углерода 0,8% и кремния 2% по формуле (29) получаем содержание углерода в сплаве, равное 3,90%. В результате опытных плавов с загрузкой науглероживающего реагента на зеркало металла после расплавления всей шихты и высокой интенсивности электромагнитного перемешивания сплава получено среднее значение концентрации углерода в чугуна 3,85% (см. табл. 16, II). Сходимость этого результата с расчетным хорошая.

Таблица 17

T, °C	Степень насыщения углеродом при концентрации кремния			
	0 %	0,5 %	1,0 %	2,0 %
1200	4,38	4,19	4,04	3,73
1300	4,63	4,45	4,29	3,98
1400	4,90	4,71	4,56	4,25
1450	5,02	4,83	4,68	4,37
1500	5,15	4,96	4,81	4,50
1550	5,27	5,08	4,93	4,62

При науглероживании расплава необходимо корректировать условия процесса в зависимости от химического состава жидкого металла. Поскольку скорость науглероживания обусловлена концентрацией углерода в расплаве (рис. 34), следует, разумеется, корректировать продолжительность науглероживания. В расплаве высокомарганцовистого чугуна углерод усваивается полностью, в то же время угар углерода в расплаве с высоким содержанием кремния составляет 18% (рис. 35 [4]). Опыт производственных плавов показывает, что каждый процент присутствующего в расплаве кремния снижает усвоение углерода на 4—5%. Науглероживание жидкого стального сплава целесообразно производит перед добавлением ферросилиция, который в жидком чугуна усваивается практически полностью.

Эффективность науглероживания значительно уменьшается при наличии в жидком металле кислорода и его соединений, что обычно бывает при использовании окисленных шихтовых материалов. В этих случаях угар угле-

рода реагента может достигать 20—25%. Поэтому рекомендуется при необходимости загружать в печь вместе с окисленной шихтой дополнительное количество науглероживающего реагента.

Таким образом, науглероживание стального сплава в индукционных печах промышленной частоты зависит от интенсивности перемешивания, температуры и качества науглероживающего реагента. Лимитирующий этап процесса — диффузионный

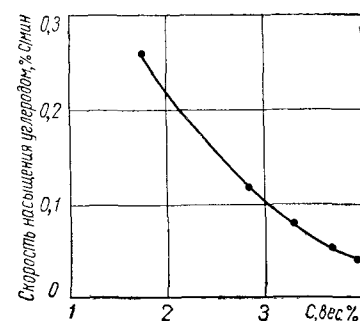


Рис. 34. Зависимость скорости науглероживания от концентрации углерода в расплаве.

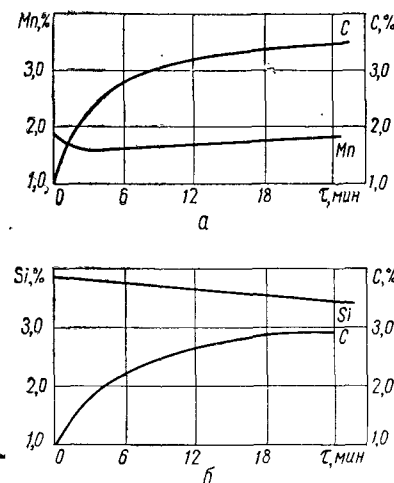


Рис. 35. График усвоения углерода в расплаве с высоким содержанием марганца (а) и кремния (б).

перенос углерода в гидродинамическом пограничном слое сплава вокруг частиц науглероживателя.

Влияние химического состава применяемых композиций чугуна на процесс науглероживания второстепенно, но повышение концентрации кислорода в жидком сплаве существенно увеличивает угар карбюризатора. Лучшим по своему действию является реагент, чистый по химическому составу, без золы и инородных включений. Для электропечей емкостью 6—10 т рекомендуется применять электродный порошок с размерами частиц 5—10 мм.

При периодической загрузке науглероживателя в жидкий сплав одновременно с введением порций шихты наблюдается уменьшение усвоения реагента, однако этот способ более экономичен по сравнению с режимом науг-

лероживания в конце плавки после расплавления всей шихты.

Большое число действующих факторов затрудняет управление процессом науглероживания и вызывает необходимость строгого соблюдения рациональной технологии науглероживания.

Поддерживая постоянство условий плавки, можно стабильно получать заданную концентрацию углерода с ошибкой $\pm 0,1\%$.

Статистическая обработка данных производственных плавков показала высокую вероятность достижения заданной концентрации углерода в сплаве. Кривые распределения содержания компонентов в чугунах соответствовали закону нормального распределения.

Для повышения стабильности и эффективности процесса науглероживания в последнее время используют специально приготовленные науглероживающие брикеты, в некоторых случаях науглероживание производят вдуванием в расплав порошкообразного графита в струе азота или аргона. Последний способ целесообразен при науглероживании отдельных порций жидкого металла, особенно с различным содержанием углерода.

2. УГАР (ПРИГАР) ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПЛАВКЕ ЧУГУНА В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ

Угар элементов при расплавлении шихты и термовременной обработке жидкого чугуна. При плавке в индукционных печах металл имеет постоянный контакт с футеровкой печи и атмосферой. Кроме того, в печь вместе с шихтой попадают окислы и металлические примеси. Это вызывает различные реакции, вследствие которых одни элементы окисляются и удаляются из печи, а другие восстанавливаются. Наряду с температурой нахождение реакции влияет также и поверхность, где эти реакции протекают. При постоянных геометрических размерах поверхности ее влияние вследствие интенсивного перемешивания расплава в индукционных печах промышленной частоты усиливается.

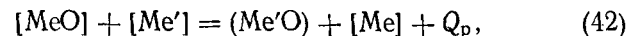
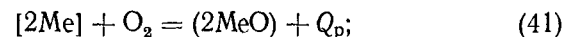
Результаты исследований равновесия марганца и кремния [96], влияния легирующих элементов и техники легирования [96], шлакообразования [81], интенсивности про-

текания реакций между одинаковыми и разными фазами в тигле индукционной печи не дают полного представления о процессах, происходящих при выплавке синтетического чугуна.

При изучении процессов, происходящих в жидком металле в случае различных режимов ведения плавки, последующей выдержки или перегрева большое внимание уделялось выбору шихтовых материалов, постоянству выбранных условий плавки и отбору проб. Металлической шихтой служила чистая дробленая стальная стружка не легированных мягких сталей. Пробы для анализа химического состава чугуна отбирались двукратно, прогретой футерованной ложкой емкостью 5 кг и заливались в сухие песчаные формочки. Для определения угара углерода и кремния в процессе выдержки и перегрева жидкого металла пробы для химического анализа заливались в специальный кокиль с последующим охлаждением водой. Полученные белые образцы затем дробились. Параллельно проводили три химических анализа. Шлак для анализа отбирался в четырех попарно противоположных местах. Весь шлак охлаждался водой, затем дробился и осреднялся методом последовательного деления. Параллельно проводили три анализа химического состава шлака.

Для определения угара элементов при легировании чугуна ферросплавы вводили в сплав при перегреве чугуна до 1400°C . Пробы на химический анализ отбирались до ввода ферросплава и после его расплавления. С целью нахождения металлургического и общего угара проводились балансовые плавки в печи с новой футеровкой. Шихта, шлак и жидкий чугун тщательно взвешивались.

При индукционной плавке чугуна основными реакциями являются реакции окисления и восстановления элементов:



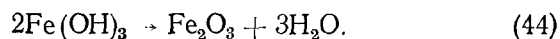
где Me — металл; Me' — примесь; Q_p — тепловой эффект реакции.

Угар примесей может происходить также за счет восстановления кремния из футеровки, шлака или включений в металле согласно реакции

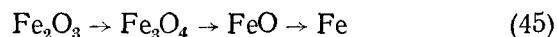


Общий угар при переплавке чугунной стружки составляет 7,8%, стальной стружки — 6,8%, обрезки динамной стали — 5,6% (табл. 18). Такой угар объясняется большим процентом засоренности шихты и окисленностью ее вследствие большой удельной поверхности.

Как известно, ржавчина содержит соединения Fe_2O_3 и $\text{Fe}(\text{OH})_3$. При нагревании из гидроокиси железа удаляется влага [50]:



Затем при высоких температурах окислы железа в присутствии марганца, кремния и углерода восстанавливаются по схеме



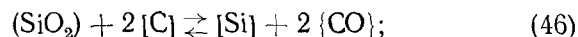
с соответствующим угаром углерода, марганца и кремния.

Результаты исследования чугунов, выплавленных из сильно окисленной стружки со ржавчиной, показали, что угар металла увеличивается и может достигнуть в определенных случаях 14%. При этом образуется значительное количество шлака, а износ футеровки прогрессирует.

При расплавлении чугунной стружки (загрузка в жидкий чугун) средний угар углерода составляет 4,30%, кремния — 4,07%, марганца — 1,37%, фосфора — 2,18%, серы — 1,97%, хрома — 4,4%, никеля — 2,4%. В отдельных плавках величина угара может колебаться в следующих пределах: углерода — 3,9—4,7%, кремния 3,5—4,9%, марганца — 0,7—2,1%, фосфора — 1,2—3,7%, серы — 1,2—2,5%, хрома — 3,4—5,3%, никеля — 1,5—3,4%.

При переплавке стальной стружки и листовых отходов величины угара элементов существенно снижаются, поэтому приведенные значения угара элементов при переплавке чугунной стружки являются максимальными для данных условий плавки.

При изотермической выдержке жидкого чугуна угар элементов может изменяться в значительных пределах в зависимости от температуры. Равновесие реакции взаимодействия углерода расплава с кремнеземом футеровки



$$K_{\text{Si,C}} = \frac{K_{\text{Si,O}}}{K_{\text{C,O}}} = \frac{[\text{Si}] \cdot [\text{O}]}{[\text{C}]^2 \cdot [\text{O}]} = \frac{[\text{Si}]}{[\text{C}]^2} \quad (47)$$

Таблица 18

Наименование шихты	Остаток металла в печи, т	Вес шихты, т	Количество шлака, т	Количество металла в шлаке, т	Количество жидкого чугуна, т	Примеси, %	Температура металла, °C	Общий угар, %	
								плавки	средний
Чугунная стружка	2,0	6,0	0,52	0,052	7,50	3,1	1460	7,8	7,8
	2,5	5,2	0,51	0,071	7,24	2,9	1440	8,4	
	2,7	5,3	0,43	0,050	7,59	2,7	1450	7,2	
Стальная стружка	2,4	5,4	0,39	0,040	7,45	3,4	1450	6,5	6,6
	2,8	5,1	0,40	0,043	7,53	2,2	1450	7,0	
	2,5	5,2	0,36	0,035	7,37	2,5	1460	6,3	
Обрезь динамной стали	2,4	5,7	0,36	0,040	7,74	1,7	1460	5,6	5,6
	2,1	5,6	0,32	0,030	7,40	1,9	1450	5,2	
	2,6	5,3	0,35	0,033	7,60	1,6	1450	6,0	

зависит от величины перегрева над кривой равновесия реакции (рис. 36 [91]).

Поскольку при определении константы равновесия принимается ряд допущений (давление окиси углерода 1 ат, концентрация железа в расплаве 100% и т. д.), то направление реакции оценивается с ошибкой. Чем выше концентрация углерода в сплаве, тем больше ошибка, однако ясно, что действие углерода жидкого металла на протекание реакции значительно сильнее действия кремния.

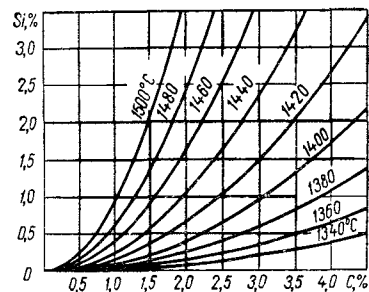


Рис. 36. Изотермы равновесия реакции восстановления кремния углеродом в жидком железе.

Влияние углерода жидкого металла сказывается на уменьшении активности кремния в сплаве, что облегчает переход его из футеровки тигля в жидкий металл.

Низкотемпературная изотермическая выдержка металла в индукционной печи почти не влияет на изменение содержания всех элементов, сопутствующих железу. Так, например, при выдержке чугуна в течение двух часов при температуре 1420°С содержание элементов колебалось в узких пределах: углерод 3,24—3,23%; кремний 1,62—1,56%; марганец 0,83—0,79%. В столь же узких пределах сохранилось содержание углерода, кремния, марганца в чугуне во время четырнадцатичасовой выдержки при 1300°С. С повышением температуры и времени выдержки содержание углерода и кремния взаимозависимо изменяется (рис. 37 [4]). Практические данные многократного определения угара основных элементов чугуна при выдержке в интервале температур 1350—1550°С приведены на рис. 38 (табл. 19). Угар углерода возрастает с повышением температуры перегрева и увеличением времени выдержки. Содержание кремния при низкотемпературной выдержке практически не изменяется, а начиная с температуры 1400°С кремний пригорает. Максимальная концентрация марганца и хрома в ис-

следованных чугунах равна соответственно 0,8 и 0,3%; их угар при выдержке незначителен.

Поскольку перегрев жидкого металла можно осуществлять с различной скоростью, интенсивность электромаг-

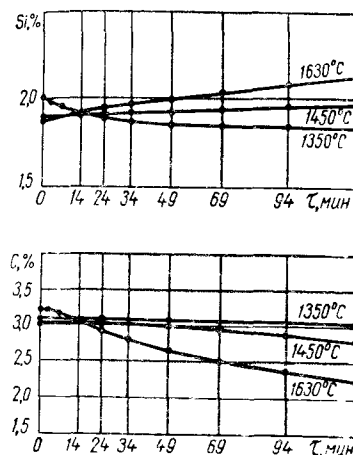


Рис. 37. Изменение концентраций кремния и углерода в зависимости от времени и температуры выдержки в тигельных печах с кислой футеровкой.

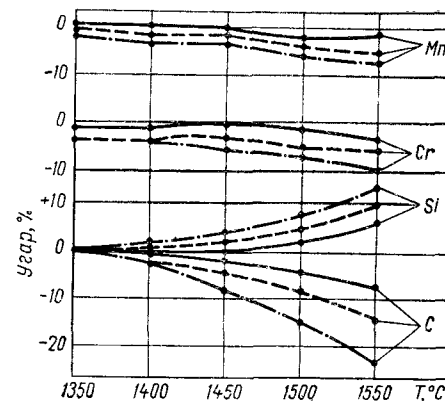


Рис. 38. Зависимость величины угара основных элементов чугуна от температуры и времени выдержки в тигельных печах с кислой футеровкой и емкостью 6—8 т (сплошные линии — время выдержки 1 ч, пунктирные — 2 ч, штрих-пунктирные — 3 ч).

нитного перемешивания расплава также будет различна, что влияет на величину угара элементов.

Результаты эксперимента показали, что скорость изменения концентрации углерода возрастает с увеличением интенсивности нагрева (рис. 39). Из рис. 39 видно, что при нагреве жидкого металла от 1225 до 1600°С в течение 35 мин угар углерода составил 0,20% (кривая 1). При интенсивном нагреве расплава (кривая 2) скорость выгорания углерода больше и взаимосвязана с пригаром кремния. Концентрация кремния во время нагрева расплава будет минимальной при температуре равновесия реакции восстановления кремния углеродом. Для жидких сплавов, химический состав которых соответствует составу обычных серых чугунов, эта температура примерно равна

Таблица 19

Температура перегрева, °С	Угар элементов при выдержке в печах с кислой футеровкой, %											
	C			Si			Mn			Cr		
	1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч	1 ч	2 ч	3 ч
1350	0,80	0,19	0,45	0,0	0,0	0,0	0,0	0,57	1,73	1,80	3,64	3,64
1400	0,55	1,29	2,11	0,0	0,0	0,0	0,0	1,23	1,82	1,60	3,22	3,22
1450	2,48	4,48	6,74	+0,34	+0,68	+1,18	0,0	1,20	1,82	1,34	3,00	4,45
1500	5,00	8,95	14,90	+0,99	+2,31	+4,58	1,73	2,87	4,00	1,53	4,61	7,70
1550	7,95	14,50	24,30	+3,22	+7,15	+11,30	2,00	4,00	5,48	4,23	5,60	8,45

Примечание. Знаком «+» обозначен пригар.

1400° С. Таким образом, на изменение концентрации кремния в сплаве температура оказывает, а скорость нагрева не оказывает заметного влияния. Так, при температуре 1500° С пригар кремния в обоих случаях составил около 0,06%, хотя время нагрева было различным (20 и 30 мин).

Изменение скорости угара элементов в жидком чугуне при различной интенсивности нагрева объясняется изменением темпа повышения температуры металла и условий его окисления вследствие различной интенсивности перемешивания. Общий угар и угар отдельных элементов при выплавке синтетического чугуна в индукционных печах меньше, чем в вагранке, и может быть сведен к минимуму. При использовании в качестве шихты рассыпной стружки интенсивное электромагнитное перемешивание уменьшает общий угар металла. Угар элементов при расчете шихты рекомендуется определять по формуле

$$\% \text{ угара} = A + B\tau, \quad (48)$$

где A и B — коэффициенты (табл. 20), характеризующие соответственно величину угара элемента при расплавлении стружки и перегреве до 1350° С и усредненное значение угара (пригара) при перегреве и изотермической выдержке в интервале температур 1350—1550° С. Время исчисляется в часах.

Образование шлака при индукционной плавке чугуна. В тигельных индукционных печах с кислой футеровкой при низких температурах выдержки жидкого чугуна шлаки образуются в виде корки, состоящей главным образом из кремнезема. Вследствие косвенного нагрева шлаков их температура ниже температуры жидкого металла и они

Таблица 20

Температура перегрева, °С	C		Si		Mn		Cr	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1350	4,3	0,15	4,1	0,0	1,4	0,58	4,4	1,21
1400	4,3	0,73	4,1	0,0	1,4	0,61	4,4	1,07
1450	4,6	2,25	4,1	-0,39	1,4	0,61	4,4	1,48
1500	4,9	5,00	4,6	-1,53	1,4	1,33	4,4	2,57
1550	5,4	8,11	4,8	-3,77	1,4	1,82	4,4	2,82

практически не реакционны. Если температура чугуна выше температуры равновесия реакции восстановления кремнезема углеродом, шлак на поверхности расплава не образуется, так как углерод предохраняет кремний от окисления. С повышением содержания углерода в расплаве температура появления шлаковой пленки понижается.

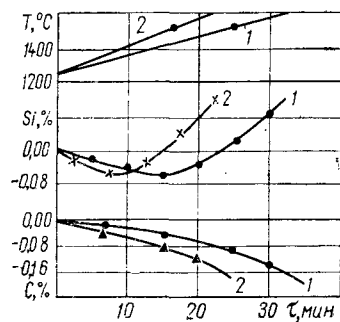


Рис. 39. Изменение концентрации углерода и кремния в жидком чугуне при различных режимах нагрева в печи ИЧТ-6.

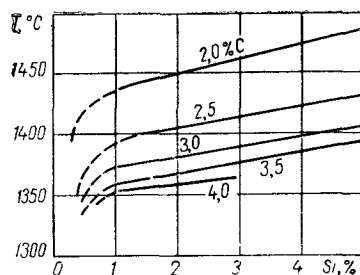


Рис. 40. Зависимость температуры шлакообразования от содержания углерода в расплаве.

ется (рис. 40). Необходимо стремиться выплавлять чугун с возможно низкой температурой шлакообразования, чтобы при кристаллизации расплава избежать выделения в нем шлаковых включений. При перегреве чугуна шлаковая корка на его поверхности растворяется. Однако значительное повышение температуры равновесия реакции восстановления кремнезема углеродом вызывает появление угара последнего и разъедание футеровки.

В табл. 21 приведены результаты анализа шлака в индукционной печи с кислой футеровкой во время выдержки чугуна эвтектического состава при 1500°C , а в табл. 22 — во время перегрева жидкого синтетического чугуна от 1400 до 1500°C . Содержание кремнезема в шлаке повышается при одновременном восстановлении марганца из окислов и переводе его в металл. Поскольку в процентном отношении со всем сплавом марганец составляет малую часть, то повышение его содержания в металле весьма незначительно. Увеличение концентрации глинозема в шлаке обусловлено разрушением футеровки.

Таблица 21

Время выдержки, мин	Содержание окислов, %				
	SiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃	Прочие
0	43,74	16,88	27,69	2,01	9,68
10	60,63	16,41	12,21	5,25	5,48
19	69,05	11,93	8,51	10,63	3,88

Таблица 22

Содержание окислов, %			
SiO ₂	FeO	MnO	Al ₂ O ₃
73,90	9,07	3,26	3,07
79,78	3,31	1,92	8,24

Шлак индукционной плавки содержит много закиси железа, которая образует с кремнеземом тигля легкоплавкое соединение — фэйалит, плавящееся уже при 1200°C . В этом случае стойкость футеровки резко падает. Применение сильно окисленной шихты увеличивает количество закиси железа в шлаке. Вследствие перемешивания расплава частички шлака попадают и в нижнюю часть ванны, что также способствует износу футеровки. Снижения содержания закиси железа в расплаве можно достичь уменьшением доли легковесной шихты в завалке, а также присадкой раскислителей (углерода, карбида кремния). Отсутствие серы в карбиде благоприятно для увеличения консистенции шлака и стойкости футеровки. Иногда при раскислении чугуна в печи карбидом кремния отмечается уменьшение расходов на футеровку.

В кислых печах никель, марганец, молибден, хром, алюминий ошлаковываются и тем сильнее, чем выше их относительная концентрация и интенсивнее электромагнитное перемешивание расплава, усиливающее парообразование металлов. Некоторые элементы, встречающиеся как примеси в шихте, исключительно энергично взаимодействуют с кремнеземом футеровки, способствуя ее разрушению. Наиболее вредное влияние оказывают элементы

с низкой температурой парообразования (табл. 23 [73]). К ним относятся свинец и цинк. Предполагается, что пары металлов проникают в свободные поры футеровки, которые составляют 15—20% ее объема, и конденсируются в более холодных зонах, поскольку быстрое разрушение свидетельствует о внешнем и внутреннем агрессивном воздействии. Например, расплавление 15 т загрязненных цинком и свинцом материалов оказалось достаточным для полного выхода футеровки из строя. При этом наблюдалось появление в футеровке 0,0075% цинка и 0,0035% свинца, вызвавшие пемзообразное разрушение футеровки. Термические характеристики зон футеровки, представленные в табл. 24, свидетельствуют о резком снижении термостойкости пораженных зон.

Взаимодействие легирующих элементов с расплавом и футеровкой и их угар необходимо учитывать при введении ферросплавов в жидкий чугун. Для определения уга-ра элементов в чугун при 1400—1430° С добавляли в количестве 2% ферросилиций (Си 75), ферромарганец (Мн 5), феррохром электротермический (Хр 3), ферро-

Таблица 23

Элементы	Температура, °С		Давление пара, мм рт. ст.
	плавления	испарения	
Медь	1083,0	1227	$5 \cdot 10^{-1}$
Алюминий	659,0	1206	$1 \cdot 10^{-2}$
Свинец	327,4	1172	10
Кальций	845,0	1207	100
Магний	650,0	1102	750
Цинк	419,4	906	760

Таблица 24

Зоны футеровки	Температура, °С		
	размягчения	плавления	течения
Пенистое покрытие	1270	1460	1490
Пемзовая область	1330	1490	1510
Светло-серая область	1535	1665	1700
Светло-серая кварцевитная область	1570	1700	1730

молибден (Мо 3), никель (Н 3). При использовании этих ферросплавов угар кремния составлял 3—6%; марганца — 2—3%; хрома — 10—12%; молибдена и никеля — 3—4%.

Содержание серы в синтетическом чугуне. Немаловажное значение при выплавке синтетического чугуна имеет также определение и поддержание условий, способствующих получению низкого содержания серы в металле. Сера вносится в ванну с металлической шихтой и карбюризатором. Большая часть серы в науглероживающих реагентах, по всей вероятности, состоит из сульфидов (железа, кальция и других элементов) и небольшой части сульфатов.

В интенсивно перемешиваемой электромагнитными силами ванне металла при науглероживании заметный градиент концентраций компонентов существует только в областях, непосредственно примыкающих к поверхности раздела науглероживатель — металл. Сера является поверхностно-активным элементом и сильно снижает поверхностное натяжение жидкого железа. Поэтому повышение содержания серы в поверхностном слое расплава является самопроизвольно протекающим процессом, уменьшающим общий изобарный потенциал системы. Положительная адсорбция серы жидкой сталью зависит, таким образом, от состава расплава, свойств науглероживателя и присутствия в нем других поверхностно-активных компонентов. Углерод, кислород, кремний, алюминий — поверхностно-активные вещества. Они образуют в жидком железе соединения, более устойчивые, чем сульфиды железа. При этом переход серы в металл уменьшается. Совместное действие углерода, кислорода, кремния и алюминия может быть значительным. Теоретически при содержании 4% углерода в чугуне равновесное содержание серы должно быть всего лишь 0,0024% [92]. Расхождение результатов, полученных на практике, с расчетными в сторону увеличения содержания серы объясняется сложным взаимодействием элементов при многокомпонентности расплава.

Нерастворимые сульфиды находятся в чугуне во взвешенном состоянии и могут быть удалены в шлак при выдержке металла в печи. При малом содержании элементов, связывающих серу в чугуне, возникает преимущественно сульфид железа, который, растворяясь в металле, образует легкоплавкую эвтектику FeS — FeO (1193° С). Эта эвтектика в свою очередь, активно взаимодействуя с

кремнеземом, способствует развитию железисто-силикатной группировки, нейтрализующей серу от воздействия компонентов сплава.

Таким образом, условия низкого содержания серы в металле следующие: минимум серы науглероживателя; высокая температура сплава при науглероживании; повышение концентрации сульфидообразующих компонентов сплава (марганца, фосфора, хрома, кремния, алюминия); минимальная окисленность шихты; выдержка жидкого сплава перед разливкой при температурах 1350—1400° С.

Для практического подсчета повышения концентрации серы в металле при науглероживании можно воспользоваться такой формулой:

$$S = S_{\text{Me}} + \frac{KS_n \Delta C}{100} [\%], \quad (49)$$

где S_{Me} — содержание серы в металле, %; S_n — содержание серы в науглероживателе, %; ΔC — количество науглероживателя, %.

Коэффициент K определялся опытным путем для различных карбюризаторов при загрузке их в завалку и в конце плавки на зеркало ванны жидкого металла (табл. 25).

Таблица 25

Карбюризатор	Коэффициент усвоения серы K	
	При вводе карбюризатора в завалку	При вводе карбюризатора на зеркало металла
Уголь донецкий	0,75	0,53
Кокс:		
литейный	0,77	0,59
металлургический	0,53	0,49
сланцевый	0,67	0,56
Термоантрацит:		
кусковой	0,54	0,50
отсев	0,62	0,57
Графит:		
аморфный	0,43	0,35
кристаллический	0,74	0,74
Электродный бой	0,0	0,0
Электродный порошок	0,0	0,0

При вычислении содержания серы в металле необходимо также учитывать наличие серы в ферросплавах — в доменном и электротермическом ферросилиции, в феррохроме (0,04%), а также в ферромolibдене (0,10—0,20%) и т. д. Сера, находящаяся в ферросплавах, обычно полностью переходит в жидкий металл.

Карбюризаторы, в состав которых входит сера, повышают ее содержание в металле. В ряде случаев приходится проводить десульфурацию различными окислами и металлами (MnO , Na_2O , CaO , MgO , Mn , Mg , CaC_2 и др.).

Десульфурующая способность окиси натрия на 3—4, а карбида кальция на 1—3 порядка выше, чем окиси кальция [38, 60]. Наиболее широко для десульфурации чугуна в индукционных печах используют технологический или специальный литейный карбид кальция с температурой плавления не выше 1600° С. Перед обработкой карбидом кальция шлаки скачиваются и на поверхность металла забрасывается измельченный реагент. При перемешивании металла частички карбида кальция размером 1—3 мм должны увлекаться в глубь расплава. Время обработки зависит от интенсивности перемешивания металла и определяется опытным путем, обычно оно составляет 3—10 мин. Температура металла не должна быть выше 1500° С, а шлаки должны быстро скачиваться. Коэффициент полезного использования карбида кальция равен 0,2—0,3. При добавке, например, 1,1% карбида кальция в 4 т жидкого чугуна в печи промышленной частоты содержание серы за 10 мин снижается до 0,052%. Продувкой карбида кальция с азотом или нейтральными газами можно снизить содержание серы до 0,001%. В печах с основной футеровкой десульфурующая способность реагентов выше, чем в печах с кислой футеровкой.

В Институте проблем литья АН УССР разработан способ рафинирования металла в индукционных печах высокоосновным перегретым до 1600—1800° С шлаком [26] (рис. 41). Сущность способа рафинирования жидкого металла заключается в следующем. После расплавления металла 4 в индукционную печь 3 загружается порция флюса 2 (5—10% веса металлозавалки). Шлак расплавляется и перегревается с помощью нерасходуемых электродов 1 за счет выделения тепла при прохождении тока через жидкий шлак. Напряжение на электроды подается

из сети переменного тока через трансформатор 5. В результате интенсивного перемешивания жидкого металла в индукционной печи контактная поверхность взаимодействия металла со шлаком практически неограничена, что обуславливает высокую степень очищения выплавляемого металла от вредных примесей.

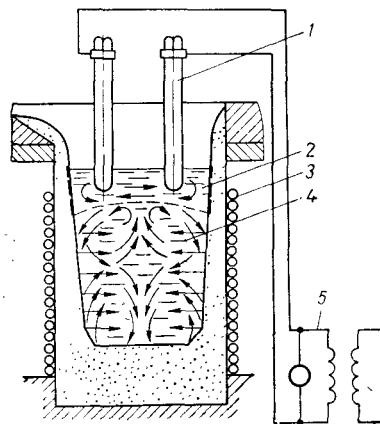


Рис. 41. Схема установки для осуществления процесса рафинирования металла в индукционных печах.

Изменяя величину напряжения, подаваемого на шлаковую ванну, температуру шлака можно регулировать в широких пределах. Например, при низкой температуре железистого шлака можно произвести дефосфорацию металла в печи, а затем, удалив этот шлак, навести известково-глиноземистый, а на максимально возможных электрических режимах провести обессеривание металла.

Опытные плавки по десульфурации металла проводили в индукционной печи ИЧТ-1 с основной футеровкой тигля при $U = 62 \div 65$ в и $I = 600 \div 800$ а. Шлак для каждой плавки готовили путем смешивания составляющих (табл. 26). В качестве источника питания при электрошлаковой обработке использовали сварочный однофазный трансформатор ТСД 2000/1.

Таблица 26

Номер шлака	Химический состав шлаков, %				
	CaF_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Na_2O
1	—	45	50	5	—
2	66	—	30	—	4
3	76	20	—	—	4

Результаты опытов по рафинированию чугуна представлены в зависимости от состава шлака и времени обработки. Номера кривых, приведенных на рис. 42, соответствуют номерам испытываемого шлака (см. табл. 26). Наибольшая степень десульфурации (рис. 42, а) была достигнута при использовании шлака системы $\text{CaF}_2\text{—CaO—Na}_2\text{O}$.

Дефосфорацию металла (рис. 42, б) осуществляли, применяя шлак $\text{CaF}_2\text{—CaO}$ с добавкой 10—15 % по весу

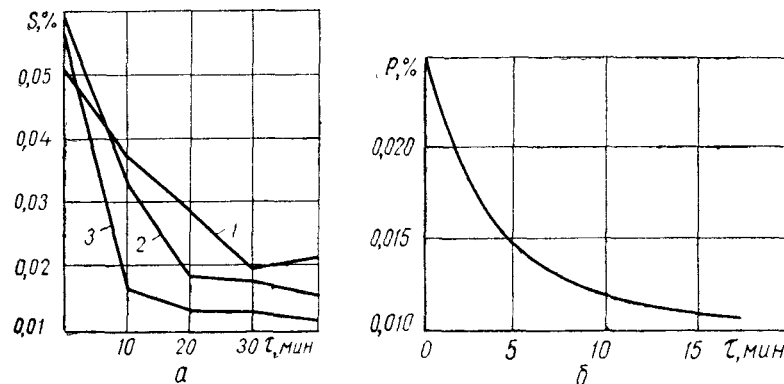


Рис. 42. Рафинирование чугуна высокоосновными шлаками.

окалины. В течение 15 мин содержание фосфора снизилось от 0,025 до 0,012 %, т. е. примерно на 50 %.

Результаты проведенных исследований показывают, что устройство для подогрева шлака позволяет эффективно рафинировать жидкий металл непосредственно в индукционных печах.

3. СОДЕРЖАНИЕ ГАЗОВ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СИНТЕТИЧЕСКИХ СПЛАВАХ

Газосодержание при плавлении шихты и термовременной обработке чугуна. По данным многочисленных исследований, растворенные в чугунах газы существенно влияют на его физико-механические свойства. Заметим, что концентрация газов в жидком металле изменяется в

зависимости от многих факторов: температуры, интенсивности перемешивания, химического состава, выдержки металла, содержания газов в исходных шихтовых материалах и т. д. Поэтому изучение газонасыщенности металла сопряжено с трудностями и требует тщательного проведения экспериментов. В большинстве случаев невозможно количественно определить ту или иную зависимость содержания газов в жидком металле, так как трудно соблюсти идентичность многочисленных действующих факторов в промышленных условиях. В связи с этим даже качественное определение изменения концентрации газов в жидком металле представляет значительный интерес.

При прохождении различных реакций между компонентами расплава, футеровкой печи и атмосферой, а также примесями, вводимыми в расплав вместе с шихтой, расплав насыщается газами. В этом случае азот находится в металле в виде положительных ионов или нитридов, водород — в виде протонов, кислород — в виде отрицательных ионов или окислов [40].

На качество металла влияет не столько абсолютное содержание, сколько состояние газов, которые образуют соединения с элементами раствора, газовые включения или растворы с фазами чугуна. Поскольку растворение газов в металлах является эндотермическим процессом, растворимость газов увеличивается с повышением температуры. Углерод и кремний понижают растворимость газов, марганец и хром повышают растворимость азота; что касается водорода, то марганец повышает, а хром понижает его растворимость [21].

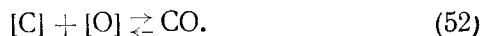
Согласно данным, приведенным в работе [84], для насыщения чугуна при перегреве до 1600° С и содержании углерода 2,5% требуется 2,2 см³ кислорода, 18 см³ азота и 9 см³ водорода на 100 г расплава. Содержание газов редко бывает равновесным, так как одновременно идут два противоположных процесса — выделение газов из расплава в атмосферу и шлак (нитриды, окислы) и поглощение газов из атмосферы и шихтовых материалов.

При введении науглероживающего реагента в жидкий металл, перемешиваемый электромагнитным полем, создается гетерогенная система, в которой основные реакции с участием твердого углерода — это реакции его окисления. Поскольку при температурах выше 1000° С устой-

чивым окислом является окись углерода, то реальными будут такие реакции:



В начале науглероживания активность углерода, растворенного в металле, меньше, чем активность твердого углерода ($a = 1$). Поэтому в первую очередь окисляется твердый углерод, особенно кислородом воздуха, имеющимся в порах частиц карбюризатора и механически вносимым в расплав во время загрузки шихтовых материалов. С повышением концентрации растворенного в сплаве углерода реакция (50) принимает следующий вид:



В связи с этим равновесное содержание кислорода в сплаве сильно изменяется, фактическая концентрация должна быть средней между равновесной с углеродом расплава и с атмосферой. Реакция окисления и восстановления в рассматриваемых условиях происходит настолько быстро, что лимитирующим этапом является подвод кислорода к контактной поверхности и диссоциация его. При постоянных давлении и температуре произведение активностей кислорода и растворенного элемента (углерода) — величина постоянная:

$$a_C \cdot a_O = n. \quad (53)$$

Эта величина возрастает с увеличением температуры, но тепловой эффект реакции мал и до сих пор не определен с достаточной точностью.

Давление кислорода в жидком железе в равновесии с углеродом изменяется обратно пропорционально концентрации последнего. С повышением содержания углерода до насыщения сплава давление кислорода в жидком железе в равновесии с углеродом при 1500° С и атмосферном давлении уменьшается в 10⁷ раз и имеет величину порядка 10⁻¹⁶ ат, что составляет примерно 2 · 10⁻⁴% О. Понижение общего давления до 0,1 ат вызывает дальнейшее уменьшение равновесного давления кислорода в сплаве примерно в 100 раз [66]. Эти данные свидетельствуют о том, что при науглероживании жидкий сплав

становится пересыщенным по отношению к кислороду. Степень пересыщения достигает 10 и более.

Электромагнитное перемешивание сильно влияет на величину равновесного давления кислорода в сплаве. Действительно, из закона Бернулли

$$\frac{\rho v^2}{2} + P_{\text{стат}} = \text{const} \quad (54)$$

следует, что при высоких скоростях движения металла в печах промышленной частоты может возникнуть в отдельных объемах расплава отрицательное давление.

Кавитационный разрыв сплошности расплава образуется в местах, где давление меньше давления насыщения металла газом, что обычно наблюдается в турбулентных центрах и возле взвешенных частиц, инициирующих кавитацию. Таким образом, растворение углерода при электромагнитном перемешивании жидкого сплава вызывает понижение равновесного давления кислорода и выделение пузырьков окиси углерода, облегчаемое кавитационными явлениями.

В работе [61] показано, что критический радиус зародыша окиси углерода равен примерно $5 \cdot 10^{-8}$ см, расстояние между центрами молекулы окиси углерода $1,13 \cdot 10^{-3}$ см, а радиусы ионов кислорода и углерода соответственно $0,77 \cdot 10^{-3}$ и $0,60 \cdot 10^{-3}$ см. Из сопоставления этих данных следует, что размеры зародыша окиси углерода являются размером молекулы или нескольких молекул. Согласно кинетической теории Я. Френкеля размер «дырок» в жидкости также оценивается величиной порядка 10^{-8} см, следовательно, образование зародышей должно происходить относительно легко.

Рост и критический радиус пузырька окиси углерода зависят от величины поверхностного натяжения, которую трудно определить, так как невозможно учесть влияние межфазной турбулентности, изменения поверхности контакта и концентрации компонентов во время процесса науглероживания. Например, при образовании окиси углерода содержание углерода в расплаве намного выше, чем кислорода, однако диффузионные потоки этих компонентов практически равны даже при некотором различии значений коэффициентов диффузии. Поэтому изменение концентраций компонентов в диффузионном слое приблизительно одинаково, но содержание углерода на поверх-

ности раздела практически то же, что и во всей массе металла, а содержание кислорода на границе жидкий сплав — пузырек окиси углерода уменьшается. При этом активность углерода на поверхности раздела повышается, увеличивается его адсорбция, а преимущественная адсорбция углерода вызывает падение поверхностного натяжения.

В общем случае динамическое поверхностное натяжение уменьшается от максимального значения, характерного для равновесных условий, практически до нуля. Учитывая это получаем, что вероятность образования и роста пузырька окиси углерода можно выразить следующим уравнением:

$$P = A \exp \left\{ - \frac{\Delta Z}{kT} \right\}, \quad (55)$$

где A — общее число молекул углерода и кислорода в пузырьке.

В данном случае значение P может быть весьма высоким, так как изменение величины изобарного потенциала при образовании зародыша составляет одну треть его поверхностной энергии:

$$\Delta Z = \frac{1}{3} 4\pi r^2 \sigma \quad (56)$$

и стремится к нулю вследствие приближения к нулю величины динамического поверхностного натяжения.

Приведенные соображения не отражают всей сложности рассматриваемого явления, однако ясно, что при науглероживании происходит глубокое раскисление жидкого сплава, фактическая концентрация кислорода в расплаве стремится к равновесной, имеющей при 1500°C и атмосферном давлении очень малую величину (порядка $2 \cdot 10^{-4}\%$).

При экспериментальном изучении влияний условий плавки синтетического чугуна на содержание газов металл для анализа отбирали в стальной кокиль с охлаждением водой, в результате чего получали отбеленные цилиндрические образцы диаметром 7 мм и длиной около 100 мм. Из средней части образцов вырезали темплеты для определения процентного содержания азота, кислорода и водорода методом вакуум-плавления при рабочей температуре экстракции газов, равной $1600\text{—}1650^\circ\text{C}$.

При науглероживании расплава параллельно раскислению должна, очевидно, осуществляться и общая дегазация чугуна. Действительно, с увеличением концентрации углерода в жидком металле относительно количество азота и кислорода в нем уменьшается (рис. 43). Однако

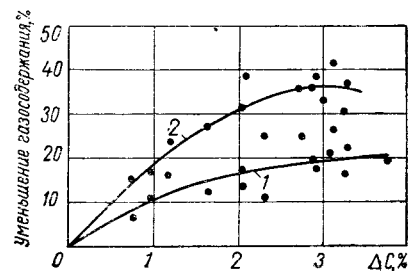


Рис. 43. Изменение концентрации азота (1) и кислорода (2) в жидком железоуглеродистом сплаве при растворении углерода.

но много влаги содержится в ржавой и загрязненной эмульсионной стружке. Шихтовые материалы при работе в индукционных печах промышленной частоты загружаются непосредственно в жидкий металл вместе с порцией науглероживающего реагента либо без нее. При этом происходит разложение влаги, свободный водород легко переходит в атомарную форму и растворяется в жидком чугуне.

Кривая концентрации кислорода в сплаве при науглероживании проходит через минимум, соответствующий 2—2,5% растворенного в процессе плавки углерода в металле. Очевидно, что при науглероживании раскисление металла происходит до некоторого уровня (около 0,001% кислорода), который соответствует равновесному содержанию кислорода в сплаве. При дальнейшем увеличении концентрации углерода возможна адсорбция кислорода на появляющихся в расплаве микрогруппировках углерода. При этом концентрация кислорода в сплаве повышается.

Введение ферросплавов при доводке чугуна всегда сопровождается внесением определенного, иногда довольно значительного, количества газов. Это обстоятельс-

более значительное влияние, чем концентрация углерода, оказывают условия плавки и химический состав исходных шихтовых материалов. Стальные отходы зачастую содержат большее количество азота, чем чугуновый лом. Концентрация водорода в чугуне может увеличиваться вследствие разложения влаги шихтовых материалов и атмосферы. Особен-

тво следует учитывать также и при модифицировании сплавов.

Существенное влияние на содержание газов в чугуне оказывает индуктивное перемешивание жидкого металла. Экспериментальное исследование влияния электромагнитного перемешивания проводили при температуре исходного чугуна 1380—1400°С и продолжительности перемешивания, равной 3 мин (рис. 44). Увеличение интенсивности перемешивания жидкого чугуна сначала приводит к уменьшению содержания азота и кислорода. Однако начиная с некоторой величины интенсивности перемешивания ($P=8\div 10\%$) дальнейшее усиление переме-

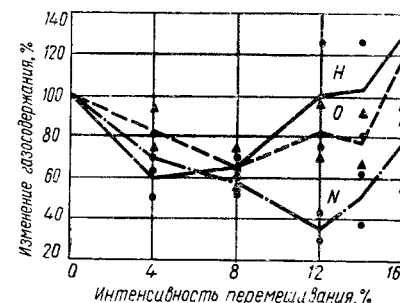


Рис. 44. Влияние интенсивности электромагнитного перемешивания на содержание газов в жидком чугуне.

шивания вызывает быстрое увеличение концентрации газов в жидком чугуне. Поскольку перемешивание сопровождается обычно нагревом, то, очевидно, надо учитывать оба фактора. Вынужденная конвекция жидкого металла, осуществляемая при интенсивности перемешивания ниже критической величины, соответствующей минимуму концентрации газов, способствует его дегазации. Скорость нагрева металла при этом невелика, медленное возрастание температуры не оказывает существенного влияния на концентрацию газов. При высокой интенсивности перемешивания температура металла быстро поднимается, растворимость газов повышается.

При критической величине интенсивности перемешивания поверхностная пленка окислов, шлаки, частицы науглероживающего реагента увлекаются потоками металла. Уместно предположить, что подобный процесс должен увеличивать концентрацию газов в жидком металле. Такая закономерность обнаружена при нагреве жидкого чугуна в индукционных печах промышленной частоты до различных температур (табл. 27). Скорость нагрева была

Таблица 27

Температура чугуна, °C		Содержание элементов, %		
исходного	после нагрева	O	N	H
1300	—	0,0012	0,0021	0,00020
—	1400	0,0016	0,0034	0,00015
1350	—	0,0008	0,0017	0,00021
—	1400	0,0015	0,0036	0,00031
1350	—	0,0014	0,0053	0,00021
—	1450	0,0020	0,0079	0,00041
1400	—	0,0014	0,0017	0,0002
—	1470	0,0016	0,0033	0,0004
1350	—	0,0017	0,0031	0,00020
—	1500	0,0028	0,0053	0,00035

одинакова для всех экспериментов, интенсивность перемешивания высокая — 12%. Эти данные свидетельствуют о том, что ионы растворенных газов в металле являются весьма подвижными частицами. Их концентрация может легко изменяться в зависимости от тех условий, в которых находится жидкий сплав, а также от первоначального содержания газов в исходных шихтовых материалах.

Значительное изменение в содержании газов наблюдается при выдержке металла в печи. В это время имеет место общая дегазация чугуна вследствие диффузии газа к поверхности жидкого металла и удаления неметаллических включений, содержащих окислы, нитриды и т. п. Однако одновременно происходит и поглощение газов на поверхности жидкого металла вследствие взаимодействия его компонентов с атмосферой. Этот процесс идет непрерывно, стремясь к динамическому равновесию, пока существует контакт металла и атмосферы. В табл. 28 приведены данные об изменении содержания газов в чугуне при различных температурах и различном времени выдержки. Содержание растворенных газов при любых температурах выдержки неуклонно снижается и тем больше, чем большей была первоначальная концентрация газов в сплаве.

Электромагнитное перемешивание расплава с интенсивностью ниже критической способствует дегазации чу-

гуна. Сводные данные о влиянии температуры, первоначальной концентрации газов в сплаве и интенсивности электромагнитного перемешивания на уменьшение содержания азота в течение 15 мин приведены на рис. 45 [84]. Интенсивность перемешивания во всех плавках была ниже критической, поэтому наблюдается уменьшение газосодержания.

Во время выдержки металла в печи перед разливкой содержание газов в чугуне приходит в соответствие с температурой и химическим составом сплава и стабилизируется. В экспериментальных плавках минимальное содержание газов в металле достигалось за 40—45 мин. Более короткое время выдержки соответствует более высокой температуре расплава.

Содержание газов при индукционной плавке значительно ниже, чем при ваграночной плавке, даже в том

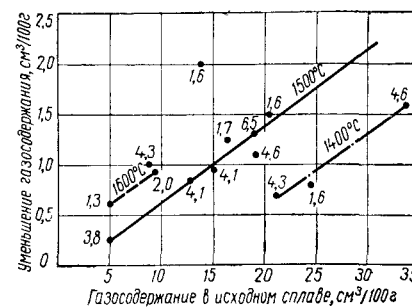


Рис. 45. Зависимость уменьшения содержания азота в течение 15 мин от температуры и первоначального содержания его в сплаве. Цифры возле точек обозначают интенсивность электромагнитного перемешивания в процентах.

Таблица 28

Температура чугуна (исходного и после выдержки), °C	Время выдержки, мин	Содержание элементов, %		
		O	N	H
1350	0	0,0022	0,0041	0,00020
	30	0,0018	0,0028	0,00020
1400	0	0,0016	0,0034	0,00015
	24	0,0011	0,0026	0,00015
1400	0	0,0015	0,0036	0,00030
	37	0,0012	0,0031	0,00025
1450	0	0,0020	0,0079	0,00040
	35	0,0013	0,0034	0,00026
1500	0	0,0028	0,0053	0,00035
	15	0,0021	0,0037	0,00020

случае, когда ваграночная шихта очень чистая (рис. 46). В вагранке расплавленный металл находится в контакте с реактивным углеродом только несколько минут, в то время как в индукционной печи процесс рафинирования металла при науглероживании более длителен и эффективен.

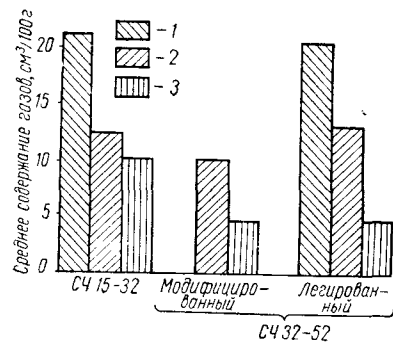


Рис. 46. Диаграмма газосодержания чугунов:

1 — коксовая вагранка; 2 — коксовая вагранка с подогревом дутья; 3 — индукционная печь промышленной частоты.

Общее содержание газов в модифицированных, легированных и синтетических чугунах марки СЧ 32-52 при индукционной плавке практически одинаково вследствие раскисления при введении в модифицированные и легированные чугуны ферросплавов. Концентрация газов в чугунах индукционной плавки составляет 4,97—6,43 см³ на 100 г или 0,006—0,007% по весу; в коксовых вагранках 18,91—21,6 см³ на 100 г или 0,020—0,23% по весу, а в коксогазовых — 10,7—

13,53 см³ на 100 г или 0,010—0,011% по весу. Для сравнения приведем данные работы [46] по среднему содержанию газов в обычных чугунах из разных плавильных агрегатов (табл. 29).

Таким образом, при индукционной плавке можно применять более низкие по качеству шихтовые материалы, что позволяет снизить себестоимость жидкого металла

Таблица 29

Тип плавильного агрегата	Содержание газов, см³ на 100 г			
	О	Н	Н	Всего
Вагранка	1,7	2,7	6,2	10,6
Электродуговая печь	1,1	2,0	6,6	9,6
Индукционная печь промышленной частоты	1,1	2,3	3,7	7,1

Неметаллические включения в жидких сплавах. Количество неметаллических включений в чугунах зависит как от исходных шихтовых материалов, так и от условий их переплавки. Стальная стружка, применяемая для выплавки синтетических чугунов, содержит значительно меньше неметаллических включений, чем чушковые литейные чугуны. Однако вместе с ней все же вносится в печь большое количество различных примесей (песка, масла, окалины и т. п.), так как стальная стружка имеет большую поверхность и значительно более подвержена загрязнению при перевозке и хранении, нежели чушковые чугуны. При переплаве стальной стружки в индукционных печах промышленной частоты жидкий металл меньше загрязнен неметаллическими включениями, чем при переплаве в вагранке. Однако неясно, насколько велико влияние условий плавки чугуна на содержание неметаллических включений в металле и можно ли устранить влияние исходных шихтовых материалов.

Для определения этих зависимостей были подвергнуты металлографическому анализу шлифы закаленных проб, отобранных для газового анализа. Предполагалось, что закалка чугуна из жидкого состояния должна выявить количество, характер и форму тугоплавких и легкоплавких неметаллических включений в жидком чугуне более полно, чем заливка проб в песчаные формы, где вследствие графитизации неизбежно должны появиться искажения результатов анализа. Кроме того, наличие графита существенно затрудняет определение неметаллических включений.

Результаты металлографического анализа показывают, что с увеличением доли стальной составляющей в шихте количество неметаллических включений уменьшается. Групповое расположение включений, имеющее место в обычных чугунах, сменяется изолированным расположением. В синтетических чугунах включения в основном равномерно распределены в металлической основе и имеют округлую форму.

Процесс науглероживания способствует удалению неметаллических включений. Анализ закаленных образцов, последовательно отбираемых по ходу науглероживания жидкого металла, свидетельствует об уменьшении количества включений с увеличением концентрации раство-

ренного углерода. При этом также изменяются форма и характер распределения включений.

Из сравнения результатов исследования видно, что при выплавке синтетического чугуна на уменьшение количества неметаллических включений в металле одновременно влияют относительная чистота материалов и рафинирующее действие переплава. В конечном итоге синтетический сплав значительно беднее неметаллическими включениями, чем обычный чугун, выплавленный из чушкового металла.

Изотермическая выдержка жидкого чугуна способствует дальнейшему очищению металла от неметаллических включений. В этом случае размеры включений несколько укрупняются, а их количество уменьшается. С увеличением длительности выдержки количество неметаллических включений уменьшается с затухающей скоростью. Некоторое количество включений остается в металле и определяется, очевидно, свойствами жидкого чугуна.

Влияние интенсивности перемешивания на изменение количества неметаллических включений однозначно определить не удастся, хотя, учитывая различное воздействие электромагнитных сил на жидкий металл и неметаллические включения, можно было бы ожидать рафинирования сплавов. Но, вероятно, конвективные потоки металла увлекают за собой неметаллические включения и разносят их вверх и вниз в объеме жидкого металла. С превышением критической скорости перемешивания, способствующей вовлечению шлаковых частиц с поверхности жидкого чугуна в глубь ванны, количество неметаллических включений в металле увеличивается. Очевидно, для рафинирования синтетического чугуна благоприятно перемешивание низкой интенсивности, при котором конвективные потоки могут доставлять включения к поверхности металла, но еще недостаточно сильны, чтобы увлечь их вглубь. Такой механизм влияния перемешивания предполагает дифференциацию воздействия в зависимости от величины включений, что затрудняет определение оптимальной интенсивности перемешивания.

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКИХ ЧУГУНОВ

1. ВЛИЯНИЕ ИСХОДНЫХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВОЙСТВА СИНТЕТИЧЕСКОГО ЧУГУНА

Влияние карбюризаторов и науглероживания жидкого сплава. Установлено, что характерные черты структуры графита и металлической основы передаются литому металлу, что в свою очередь определяет его прочностные свойства.

Большое влияние на структуру чугуна оказывают микропримеси, обычно не контролируемые химическим анализом, а также содержание растворенных газов, неметаллических включений и химических комплексов сложного состава. Эти примеси в той или иной мере сохраняются при переплаве и существенно влияют на кристаллизацию чугуна. Результаты изучения микроструктур литого чугуна показывают, что различные науглероживающие реагенты неодинаково воздействуют на количество связанного углерода в структуре чугуна, так как содержат разное количество золы и примесей. В связи с этим наблюдаются колебания прочностных свойств синтетических чугунов, выплавленных с применением различных карбюризаторов.

Для удобства сопоставления результатов испытаний различных по химическому составу чугунов данные этих испытаний переводились по методике Паттерсона в относительные величины.

Однородность зернового состава науглероживателя благоприятно сказывается на распределении графитовых включений в литом чугуне (рис. 47). Крупные частицы науглероживателя (более 20 мм) растворяются медленно и дают крупные включения графита, мелкие частицы (менее 5 мм) дают мелкие и завихренные включения графита. Термовременная обработка жидкого чугуна легко устраняет неоднородность в распределении графита такого происхождения. В дальнейшем во всех экспериментах использовали только электродный порошок с частицами размером 5—15 мм.

Науглероживание жидкого металла необходимо рассматривать как сложный процесс, некоторые этапы которого оказывают положительное влияние на прочностные

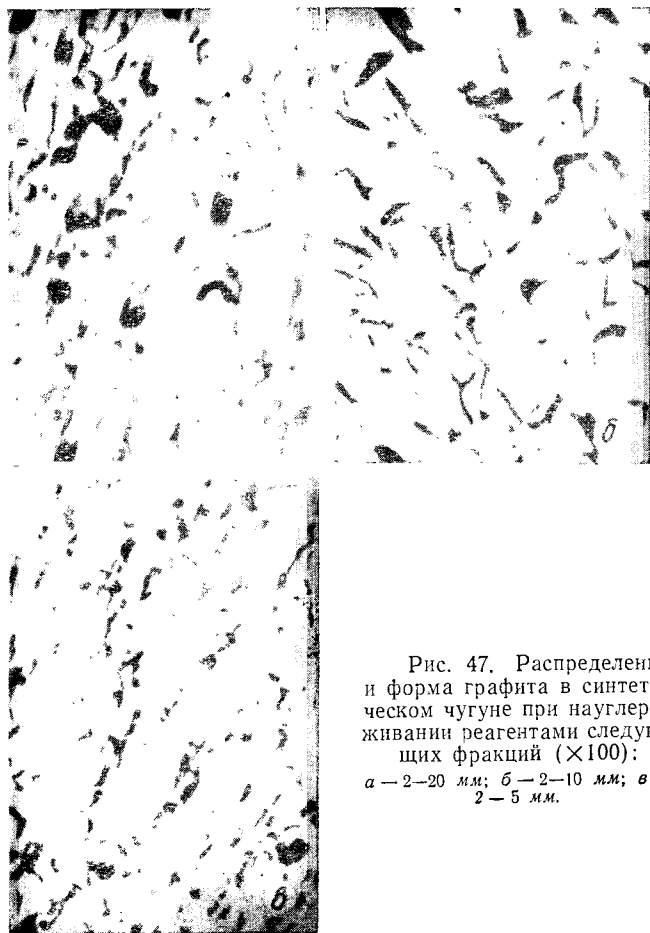


Рис. 47. Распределение и форма графита в синтетическом чугуна при науглероживании реагентами следующих фракций ($\times 100$):
а — 2–20 мм; б — 2–10 мм; в — 2–5 мм.

свойства чугуна. В работе [27] показано, что диаграмма состояния железо — углерод является по сути разрезом тройной диаграммы состояния железо — углерод — кислород. Поскольку при науглероживании металл раскисляется, то в соответствии с этой диаграммой линия рас-

воримости углерода сдвигается к низким концентрациям в чугуне. При этом возможно выделение избыточного углерода в форме пинакоидов.

Диффузионный характер растворения углерода требует достаточных температуры и времени для завершения процесса. Вблизи концентрации насыщения сплава по углероду скорость растворения реагента становится незначительной при любой достижимой интенсивности перемешивания, поэтому некоторое количество науглероживателя в высокоуглеродистом чугуне может существовать в виде частиц неограниченное время. В начале процесса не исключено присутствие микрочастиц реагента в отдельных объемах расплава, обогащенных углеродом при невысокой общей концентрации углерода в сплаве. При неполном растворении реагента и особенно при низких температурах сплава вследствие указанных причин в литом чугуне возникает вынужденная неоднородность в распределении графита, увеличиваются различия величины и формы в одном и том же образце (рис. 48). Наряду с крупными пластинами графита присутствуют мелкие завихренные, розеточный графит находится рядом с компактными и точечными образованиями. В обогащенных углеродом зонах включения графита крупные, в обедненных — мелкие. Нередки случаи междендритного расположения графита.

В результате фракционного науглероживания сталного расплава было установлено, что даже при небольших дозах реагента и благоприятных условиях науглероживания указанные особенности структуры графита неизбежны. Различие в форме, величине и распределении графита в металлической основе является следствием незавершенного процесса науглероживания, что характерно для выплавки синтетических чугунов. Из анализа уравнения (29), описывающего процесс науглероживания, видно, что это различие должно быть тем меньше, чем выше достижимая концентрация насыщения, температура науглероживаемого расплава, дисперсность частиц науглероживателя, интенсивность перемешивания и чем больше продолжительность термической обработки расплава. Производственный опыт согласуется с этими выводами. Выдержка или перегрев выше 1450°C в значительной мере устраняет неоднородность структуры графита вследствие дорастворения углерода и диффузии его в сплаве.



Рис. 48. Неоднородность структуры графита в литом синтетическом чугуна ($\times 100$).

Термовременная обработка жидкого чугуна обязательно должна сопровождать процесс науглероживания. Высокая степень рафинирования синтетического сплава при индукционной плавке способствует устойчивости жидкой фазы.

Образцы чугунов весьма близкого химического состава, но с различной долей углерода, растворенного в тече-

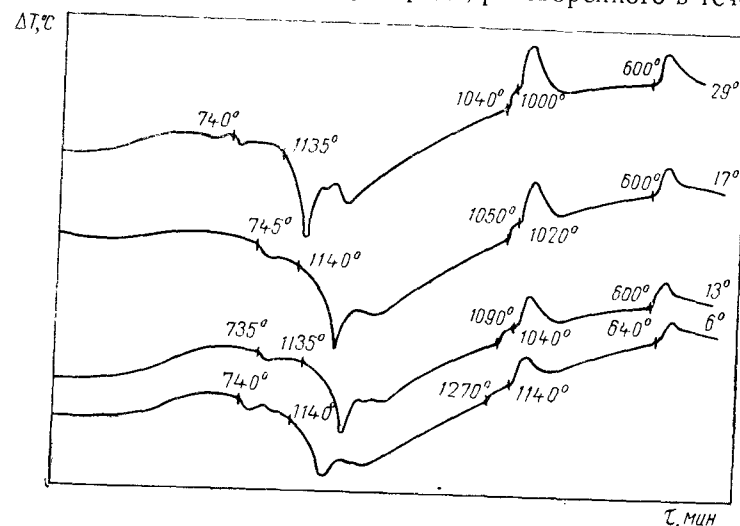


Рис. 49. Термограммы чугунов одинакового химического состава, но различного происхождения.

ние плавки, были подвергнуты дифференциальному термическому анализу на установке высокотемпературной калориметрии с бесконтактным термометром сопротивления (рис. 49). Сплав № 6—обычный чугун, сплав № 29—синтетический чугун, № 13 и 17—чугуны переходного типа с различной долей усвоенного при плавке углерода. Термограммы имеют однотипный характер для всех сплавов. При нагреве наблюдался пик, характерный для поглощения тепла при эвтектидном превращении ($735\text{—}740^\circ\text{C}$), а при дальнейшем нагреве значительно больший по величине пик, отвечающий плавлению эвтектики ($1135\text{—}1140^\circ\text{C}$). Перегибы на термограммах, соответствующие линии ликвидус, менее определены. При охлаждении сплавов со скоростью 28°C в 1 мин на термограм-

мах отчетливо наблюдались точки, характеризующие начало выделения твердых фаз из расплава, а также эвтектическое и эвтектоидное превращения. Тепловые эффекты эвтектического и эвтектоидного превращений возрастают вместе с увеличением степени переохлаждения сплавов и максимальны у синтетического чугуна. Переохлаждение синтетического чугуна по сравнению с обычным при эвтектическом превращении в условиях эксперимента составляет более 100°C , при эвтектоидном превращении — около 40°C . Склонность синтетического чугуна к переохлаждению определяет метастабильный характер его кристаллизации, что обуславливает особенности структуры и взаимосвязь первичных составляющих.

Результат изменения состояния диспергированных фаз в жидком чугуне и его рафинирования в ходе плавки — улучшение прочностных свойств синтетических чугунов по сравнению с обычными. Таким образом, при равенстве химического состава чугунов прочностные свойства их зависят от количества растворенного углерода при выплавке.

Экспериментальные данные, полученные при индукционной плавке чугуна в электропечах промышленной частоты, подтверждают это положение (рис. 50). Чугун выплавлялся из чистой стальной стружки и скрапа, перегревался в печи до 1550°C и захлаживался присадкой последней порции шихты. При разливке чугуна в ковш добавляли 0,2% ферросилиция (Си 75) во избежание отбела. При растворении малого количества углерода влияние процесса на прочность чугуна незначительно, в пределах от 1 до 3% усвоения углерода прочность монотонно возрастает, а далее повышения прочности не наблюдается.

Для практических целей при 1–3% концентрации углерода зависимость прочности чугуна при растяжении можно с малой погрешностью выразить линейной функцией, переходя к абсолютным значениям: $\Delta\sigma_{\text{в}} = |1,5\Delta C| \text{ дан/мм}^2$. Относительный предел прочности при изгибе также монотонно возрастает. Степень графитизации синтетических сплавов меньше, чем обычных чугунов, что способствует стабилизации цементита и повышению твердости металлической основы сплава. Степень графитизации сплавов, в которых усвоение углерода при плавке составляло 2% и более, практически одинакова. Очевидно,

это связано с тем, что для рафинирования сплава достаточно определенного количества карбюризатора, дальнейшее усвоение его уже не дает эффекта.

Таким образом, увеличение прочности и твердости синтетического чугуна по сравнению с обычным обусловлено изменением характеристик графита и фазового состава

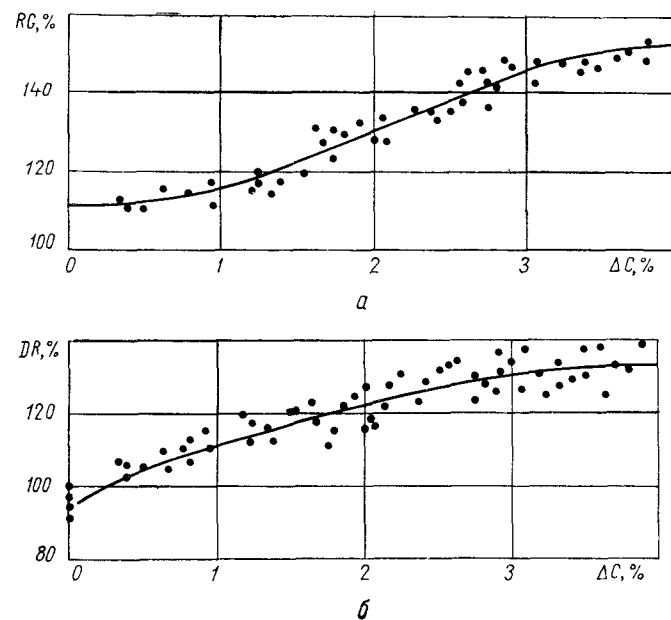


Рис. 50. Зависимость прочности при растяжении (а) и твердости (б) чугуна от степени науглероживания при выплавке.

металлической основы. Следовательно, можно получить одинаковые механические свойства чугуна при различных концентрациях углерода и прочих равных условиях, поскольку влияние содержащегося в исходных шихтовых материалах и добавляемого при науглероживании углерода на механические свойства чугуна различно (рис. 51). На правом поле номограммы представлены линии изопрочности чугунов по степени их эвтектичности, на левом — линии влияния процесса науглероживания по величине усвоенного во время плавки углерода. Например, для синтетического чугуна с общей концентрацией угле-

рода 3,6%, выплавленного из шихты с содержанием углерода 0,8% (точка *b*), и чугуна с общей концентрацией углерода 3,48%, но выплавленного из шихты с содержанием углерода 2,32% (точка *a*), эффективная концентрация углерода и прочностные свойства одинаковы. Выби-

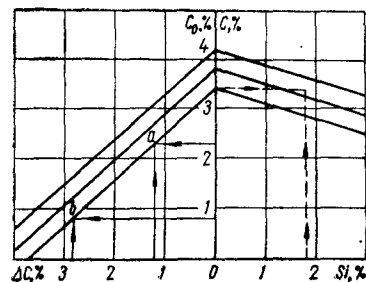


Рис. 51. Номограмма прочности чугунов с различной степенью науглероживания при выплавке.

рающая соответствующим образом начальную концентрацию углерода, можно получить чугун с заданной прочностью и повышенной степенью эвтектичности, благоприятно влияющей на его литейные свойства.

Влияние состава металлической шихты на качество чугуна. Доменные чушковые чугуны обладают целым комплексом свойств, отрицательно влияющих на качество литого металла (наличие микропримесей, устойчивых силицидов железа, большое содержание газов, графитовой спели, грубая структура металлической основы и т. д.). Условия выплавки чушковых чугунов (качество руд и агломерата, ход доменной плавки, влажность, количество, температура дутья и т. п.) определяют различие их свойств, которые сильно изменяются даже в пределах одной марки литейных чугунов. При ваграночном переплаве наследственные свойства чугунов в основном сохраняются и снижают качество литья.

Стальная шихта при выплавке синтетических чугунов в значительно меньшей мере, чем чушковые чугуны, содержит примесные компоненты сплава, особенно вредные элементы (серу, мышьяк, олово, цинк и т. п.). Применение стальной стружки в качестве металлической шихты, как наиболее дешевого материала, обуславливает появление в жидком чугуне большого количества неметаллических включений различного характера, содержание которых в дальнейшем зависит от технологического режима плавки. Использование чистой дробленой стальной стружки, периодическая очистка металла от шлака, пе-

регрев и выдержка жидкого сплава в печи способствуют очищению синтетического чугуна. Содержание сопутствующих элементов в синтетическом чугуне получается стабильно низким (табл. 30). Величина концентрации ванадия, меди и титана в синтетическом чугуне меньше критических значений, характеризующих вредное действие этих элементов на графитизацию чугуна с шаровидным графитом: титана — 0,04%, меди в присутствии титана — 0,08%, ванадия — 0,5%. Алюминия и кальция обнаружены только следы, а мышьяк, свинец, олово, цинк и магний не обнаружены.

Таблица 30

Номер плавки	Содержание элементов, %		
	V	Cu	Ti
1	0,06	0,03	0,020
2	0,06	0,03	0,030
3	0,06	0,03	0,020
4	0,06	0,03	0,022
5	0,06	0,03	Следы
6	0,06	0,03	0,020
7	0,06	0,03	—
8	0,077	0,03	—
9	0,071	0,03	0,039

По сравнению с ваграночным переплавом при индукционной плавке легче получить нужный химический состав чугуна с малым количеством вредных примесей, неметаллических включений и растворенных газов. По данным фирмы «ФИАТ» [68] синтетические чугуны обладают более высокими прочностными свойствами, чем ваграночные, а твердость и обрабатываемость их примерно одинаковы. Приведенные в табл. 31 данные подтверждаются также и другими исследованиями. Отмечается сохранение зависимости прочностных свойств синтетических чугунов от исходных шихтовых материалов, хотя и в меньшей мере, чем при ваграночной плавке. Имеются примеры успешной выплавки синтетических чугунов из некачественных шихтовых материалов, использование которых для выплавки обычных чугунов практически невозможно. Вместе с тем есть сведения о большом влиянии температурного режима, продолжительности плавки и других технологических условий на свойства чугуна.

Таблица 31

Чугуны	Степень эвтектич- ности	Относи- тельный предел прочнос- ти при растя- жении	Относи- тельная твердость	Показа- тель качества
Ваграночные	0,848	0,984	0,976	1,01
Синтетические (карбюризатор в за- валке):				
из отходов мягкой стали	0,92	1,03	0,96	1,08
из листовых отходов	0,86	1,28	0,97	1,31
из рядового скрапа	0,91	0,97	1,05	0,92
из отходов стали с 0,12% С	0,80	1,34	1,08	1,30
Синтетические (карбюризатор на зеркало металла):				
из отходов мягкой стали	0,89	1,01	0,98	1,03
из листовых отходов	0,93	1,19	1,04	1,14
из отходов стали с 0,12% С	0,86	1,17	1,03	1,14

При исследовании влияния состава шихтовых материалов на свойства выплавляемого металла чугуны выплавляли в индукционных печах промышленной частоты емкостью 6—8 т. Во всех плавках использовалась кислая футеровка, науглероживание производилось электродным порошком, шлакообразующие добавки не применялись. Шихтовые материалы загружались в плавильную печь порциями по 500—550 кг. Каждая завалка загружалась после расплавления предыдущей, т. е. в жидкий металл. При этом металл не перегревался выше 1300° С. После расплавления шихты металл перегревался до температуры 1500° С, температура заливки образцов поддерживалась в пределах 1350—1360° С. Образцы отливались в сырых песочно-глинистых формах по четыре штуки в каждой, в вертикальном положении, подвод металла — сифонный. Для каждого варианта отливалося 12 образцов диаметром 30 мм и длиной 350 мм, из которых выбиралось восемь наиболее качественных для проведения испытаний.

В качестве модификатора использовали ферросилиций марки Си 75, который измельчался на куски размером 3—8 мм и вводился в ковш под струю металла при разливке из печи. Количество модификатора колебалось в пределах 0,4—0,6% веса жидкого чугуна.

Выбранные для исследования исходные шихтовые материалы по условиям их образования и использования для переплавки в непосредственной близости от места производства отходов являются наиболее перспективными вторичными металлами. Поскольку стружка металлов и листовые отходы имеют малый объемный вес и развитую внешнюю поверхность, при хранении и перевозках наблюдаются большие безвозвратные потери металла и сильное окисление. Поэтому использование этих материалов для производства чугуна в индукционных электропечах большой емкости наиболее рационально.

Для синтетических немодифицированных чугунов, полученных как на стальной стружке, так и на высечке, характерно наличие большого количества эвтектического графита и выделение его в виде мелких компактных форм. Наблюдается присущая синтетическому чугуну неоднородность распределения графита на некоторых участках и утолщенные узлы на включениях графита. Для обычного чугуна характерна более полная графитизация за счет меньшего количества перлита и значительное число пересекающихся включений, что особенно заметно при уменьшении эвтектичности. С понижением степени эвтектичности в синтетических чугунах увеличивается изолированность графитных включений, возрастает их компактность. Нередки случаи образования структуры междендритного графита, причем совершенно отчетливо видно расположение аустенитных зерен. Количество графита и длина включений в обычном чугуне во всем интервале значений эвтектичности больше, чем в синтетических чугунах, полученных из стружки и листовой высечки.

Металлографический анализ образцов немодифицированного синтетического чугуна, выплавленного из стальной стружки со степенью эвтектичности 0,85—1,00, показывает, что с увеличением эвтектичности длина графитовых включений закономерно увеличивается от 95 до 130 мк, т. е. остается в пределах класса Гд1 (рис. 52). Распределение графита изменяется от изолированных включений до колоний средней и малой степени изолированности (Гр1—Гр4). Розеточный (Гр7) и междендритный точечный графит (Гр9) обычно появляются в центре образца. Форма включений графита в основном пластинчатая мало- и среднезавихренная (Гр1—Гр2). Площадь,

занимаемая графитом, с увеличением эвтектичности изменяется в среднем от 8 до 12%.

Образцы синтетического чугуна, полученного из листовой высежки, примерно в том же интервале эвтектичности (от 0,85 до 1,02) имеют несколько большее разнообра-

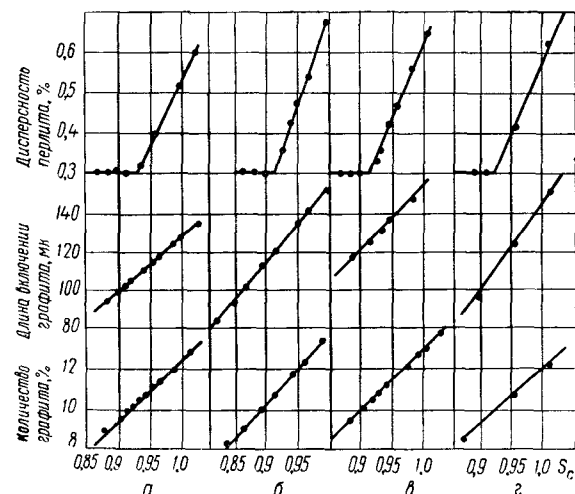


Рис. 52. Характеристики структуры немодифицированных чугунов при использовании различных шихтовых материалов:

а — стальная стружка; б — обреш динамной стали; в — чугунная стружка; г — чушковые чугуны.

разие характеристик графита; длина пластинок колеблется от 90 до 160 мм (Гд1 — Гд2), в центре образцов часто наблюдается розеточный и междендритный пластинчатый (Гр7—Гр10) графит, появляются среднезавихренная и завихренная формы включений (Гф2 — Гф3). Количество графита 8—12%.

Металлографический анализ чугуна, выплавленного на основе чугунной стружки, проводился в интервале эвтектичности от 0,89 до 1,03. Длина включений графита достигала 160 мк, форма включений пластинчатая завихренная, имелись включения розеточного и междендритного типа, но в значительно меньшей мере, чем в синтетических чугунах. Площадь, занимаемая графитом, достигала 14%.

В чугунах, выплавленных из ваграночной шихты, количество графита достигало 13,6% по занимаемой площади, форма его включений почти не отличалась от формы графита в чугунах, полученных переплавлением чугунной стружки — пластинчатая, среднезавихренная с малой степенью изолированности; встречалась графитовая спель. При этом степень эвтектичности чугуна изменялась в пределах 0,89—1,05.

Таким образом, выявлено различие характеристик графита в немодифицированных чугунах примерно одинаковой эвтектичности, но выплавленных из различных шихтовых материалов. При этом в основном отличались форма, длина и характер распределения графитовых включений, что, несомненно, является важным для оценки прочностных свойств исследуемых чугунов.

Анализ структуры металлической матрицы этих же образцов показал, что во всех образцах имеет место примерно одинаковая степень перлитизации — 9,8%, но форма перлита и его структура были различными. В чугуне, полученном из чугунной стружки, пластинки перлита более крупные, несколько разнородные по своему строению, а в синтетическом чугуне структура основы отличается более высокой однородностью как во всем сечении шлифа, так и в пределах одного зерна. Уменьшается протяженность пластинок перлита, дисперсность его несколько выше, особенно при сравнении чугунов эвтектического состава. В чугунах с низкой эвтектичностью различие структур почти неощутимо, хотя при переплавке доменных чугунов матрица сильно расчленена включениями графита. С понижением степени эвтектичности во всех чугунах возрастает дисперсность перлита. В чугуне, полученном из чугунной стружки и ваграночной шихты, различие структуры металлической основы с уменьшением степени эвтектичности проявляется более сильно, чем в синтетических чугунах, хотя можно заметить, что в чугуне из листовой высежки перлит несколько крупнее, чем в чугуне, выплавленном на основе стальной стружки. Границы перлитных зерен в обычном чугуне толстые, хорошо очерченные, в синтетическом чугуне границы зерен улавливаются только по общему изменению направления пластинок составляющих перлита. Характерные структуры матрицы различных чугунов представлены на рис. 53.



Рис. 53. Микроструктура чугунов ($\times 500$), выплавленных из стальной стружки (а), динамной стали (б) и чугуновой стружки (в).

Соответственно характеристикам структуры металлической основы и графита понижаются или повышаются прочностные свойства чугунов.

Максимальные значения прочностных свойств немодифицированного чугуна, выплавленного из различных исходных шихтовых материалов, приведены в табл. 32.

Таблица 32

Шихта	S_c	σ_b , дан/мм ²	$\sigma_{изг}$, дан/мм ²	НВ, дан/мм ²	Стрела прогиба, мм
Стальная стружка	0,85	36,8	62,0	241	3,8
	1,0	26,1	54,0	207	3,3
Обрезь динамной стали	0,84	35,0	53,1	248	3,6
	0,99	24,7	46,5	207	3,1
Чугунная стружка	0,89	29,7	50,5	217	3,5
	1,0	22,1	43,5	197	3,1
Доменные чушковые чугуны	0,90	26,0	51,4	227	3,6
	1,0	17,3	39,1	195	3,3

Таким образом, во всем интервале изменения эвтектичности наблюдается существенное превышение прочностных свойств немодифицированных синтетических чугунов над соответствующими характеристиками обычных чугунов. В синтетических чугунах особенно заметно повышаются твердость металлической основы и сопротивление изгибу.

Разброс значений прочностных характеристик образцов одной заливки в случае синтетических чугунов несколько ниже, чем при использовании обычного чугуна, что свидетельствует о большей однородности металла.

Металлографический анализ модифицированных чугунов, выплавленных из перечисленных четырех составов шихты, показал, что общие закономерности, полученные для немодифицированных чугунов, сохраняются и при модифицировании (рис. 54). Так, количество графита в синтетических чугунах меньше, чем в обычных, длина графитовых включений также меньше. Наиболее сильно от степени эвтектичности зависит длина включений графита в чугунах, полученных на основе ваграночной шихты, на следующем месте стоят чугуны из листовой высечки, затем чугуны, выплавленные из чугуновой стружки,

т. е. зависимость длины включений графита от степени эвтектичности в чугунах различного происхождения различна.

Обычный и синтетический чугун различаются формой и характером распределения графита. В обычных модифицированных чугунах графит малой изолированности и

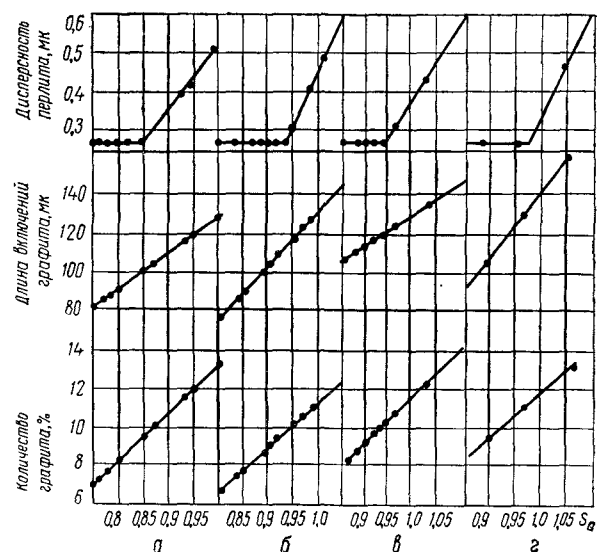


Рис. 54. Характеристики структуры модифицированных чугунов при использовании различных шихтовых материалов:

а — стальная стружка; б — обрешь динамной стали; г — чугунная стружка; г — чушковые чугуны.

завихренный наблюдается даже при небольшой степени эвтектичности, а в синтетических чугунах эти формы встречаются только лишь при эвтектическом составе. Следовательно, модифицирующий эффект в обычных чугунах слабее, чем в синтетических. Как в тех, так и в других чугунах розеточный и междендритный графит отсутствует, что является основным отличием от немодифицированных чугунов.

Степень перлитизации металлической основы в модифицированных чугунах равна 98%, дисперсность перлита в синтетических сплавах сильно зависит от степени эвтектичности, в обычных чугунах эта зависимость слабее.

Прочностные характеристики модифицированных синтетических чугунов во всем исследуемом интервале эвтектичности значительно выше, чем обычных модифицированных чугунов. Это видно из сравнения максимальных прочностных показателей (табл. 33) образцов примерно одинаковой эвтектичности.

Таблица 33

Шихта	S_e	σ_B , даг/мм ²	$\sigma_{изг}$, даг/мм ²	$HВ$, даг/мм ²	Стрела прогиба, мм
Стальная стружка	0,91	34,5	57,6	236	3,8
	1,00	30,9	53,5	223	3,8
Обрешь динамной стали	0,90	33,2	54,3	229	3,6
	0,99	26,8	49,5	212	3,0
Чугунная стружка	0,87	32,3	55,7	223	3,6
	0,95	25,7	49,8	207	3,4
Доменные литей- ные чугуны	0,92	30,4	52,5	239	4,2
	0,99	24,7	46,2	224	4,1

Результаты механических испытаний образцов опытных плавов были подвергнуты статистической обработке (табл. 34). Принятая прямолинейная зависимость прочностных характеристик от степени эвтектичности оказалась достаточно правомерной. Во всех случаях критерий надежности μ коэффициента корреляции γ достаточно высок. Наименее зависит от степени эвтектичности величина стрелы прогиба и отношение прочности чугуна при изгибе и растяжении, что естественно, так как степень эвтектичности в большей мере характеризует графитную составляющую, а не металлическую матрицу.

Шихта	Модифицирование 0,4—0,6% Си 75	$\sigma_{\text{в}},$ дан./мм ²	$\sigma_{\text{изг.}},$ дан./мм ²	НВ, дан./мм ²	Стрела прогиба, мм
Стальная стружка	—	90,0—65,6 S_c $\gamma=0,97; \mu=144$	108,1—57,5 S_c $\gamma=0,94; \mu=71$	453—251 S_c $\gamma=0,97; \mu=144$	7,3—4,3 S_c $\gamma=0,81; \mu=21$
	+	88,5—61,5 S_c $\gamma=0,98; \mu=178$	113,6—63,1 S_c $\gamma=0,95; \mu=75$	403—184 S_c $\gamma=0,96; \mu=92$	6,3—2,9 S_c $\gamma=0,79; \mu=16$
Обрезь динамной стали	—	87,9—64,5 S_c $\gamma=0,93; \mu=51,7$	91,3—46,2 S_c $\gamma=0,90; \mu=35,5$	435—228 S_c $\gamma=0,88; \mu=292$	5,8—2,8 S_c $\gamma=0,81; \mu=17,6$
	+	90,0—65,4 S_c $\gamma=0,94; \mu=64$	105,0—57,2 S_c $\gamma=0,89; \mu=35$	428—225 S_c $\gamma=0,91; \mu=42$	4,7—1,4 S_c $\gamma=0,73; \mu=13$
Чугунная стружка	—	78,5—56,2 S_c $\gamma=0,93; \mu=52$	110,0—68,3 S_c $\gamma=0,87; \mu=27$	413—221 S_c $\gamma=0,94; \mu=61$	5,8—2,8 S_c $\gamma=0,67; \mu=9$
	+	99,8—78,7 S_c $\gamma=0,89; \mu=27$	106,5—60,6 S_c $\gamma=0,90; \mu=30$	410—220 S_c $\gamma=0,96; \mu=78$	5,7—2,5 S_c $\gamma=0,69; \mu=8$

Наибольший разброс значений стрелы прогиба и связанной с ней прочности синтетического и обычного немодифицированных чугунов при изгибе по сравнению с другими характеристиками можно отнести также к недостаткам методов испытаний. Однако абсолютные значения коэффициента корреляции в обычных чугунах (0,54; 0,67 и 0,87) значительно меньше, чем в синтетических (0,77; 0,81 и 0,94).

Значение коэффициента корреляции зависимостей основных характеристик прочности немодифицированного чугуна от степени эвтектичности достаточно велико и колеблется от 0,87 до 0,97. Наиболее высок коэффициент корреляции для синтетических чугунов, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости и плотности полученных экспериментальных данных и достоинствах метода его получения. Поскольку критерий надежности коэффициента корреляции для синтетических чугунов большой, прочностные свойства этих чугунов существенно зависят от степени эвтектичности, т. е. получаемая прочность главным образом определяется графитной составляющей и параметрами включений графита.

Ошибка расчета по формулам табл. 34 невелика, они пригодны для практического использования; для пределов прочности при растяжении и изгибе ошибка не превышает 3 дан./мм², а для значений твердости — не более 10 дан./мм² (рис. 55).

Твердость синтетических чугунов, согласно полученной линии регрессии, значительно выше, чем твердость обычного чугуна. При этом твердость чугуна, полученного из высечки динамной стали, даже несколько выше, чем у чугуна из стальной стружки, что можно объяснить повышенным содержанием кремния в высечке и образованием силикоферрита.

С уменьшением степени эвтектичности отдельные прочностные свойства немодифицированных чугунов возрастают неравномерно. Так, например, предел прочности при изгибе увеличивается значительно быстрее, чем предел прочности при растяжении, особенно у синтетического чугуна, полученного из стальной стружки. Сильное снижение прочности при изгибе в случае увеличения степени эвтектичности наблюдается у обычного чугуна, выплавленного на основе чугунной стружки.

В модифицированных чугунах различного происхождения значение коэффициента корреляции прочностных характеристик и степени эвтектичности высоко и колеблется от 0,89 до 0,98. Наибольшее значение коэффициента корреляции имеют синтетические чугуны, полученные из

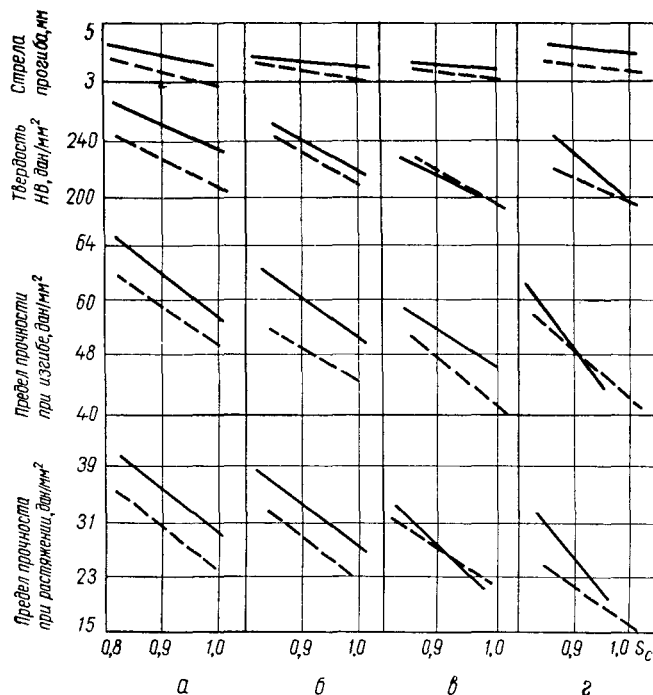


Рис. 55. Свойства немодифицированных (пунктирные линии) и модифицированных (сплошные линии) чугунов индукционной плавки: а — стальная стружка; б — обрезь динамной стали; в — чугунная стружка; г — чугуновые чугуны.

стальной стружки. Приведенные в табл. 34 формулы позволяют вычислить прочностные характеристики модифицированных чугунов индукционной плавки с ошибкой, не превышающей $\pm 1,3$ да/мм² для предела прочности при растяжении, $\pm 3,1$ да/мм² для предела прочности при изгибе и ± 9 да/мм² для твердости, что вполне достаточно для практических целей.

Согласно формулам регрессии (см. табл. 34) проч-

ность при растяжении модифицированного чугуна, выплавленного из стальной стружки, мало зависит от степени эвтектичности, что свидетельствует об эффективности модифицирования. Значение прочности при растяжении для чугуна, выплавленного на основе чугунной стружки, зависит от степени эвтектичности. С понижением степени эвтектичности разница в эффективности модифицирования для чугунов различного происхождения существенно уменьшается.

Формулы регрессии для прочности при изгибе модифицированных чугунов дают большое расхождение результатов расчета в области низких значений степени эвтектичности. Значения предела прочности при изгибе для модифицированного синтетического чугуна, полученного из стальной стружки, выше, чем для чугуна из листовой высеки.

Наибольшее расхождение наблюдается в значениях твердости, причем угол наклона линий для модифицированных чугунов из стальной и чугунной стружки примерно одинаковый. Твердость чугуна, выплавленного из обрезь динамной стали, больше зависит от степени эвтектичности, чем других чугунов, что, очевидно, связано с большим содержанием кремния в исходной шихте.

Для исследованных чугунов при модифицировании наблюдается относительно равномерное возрастание всех прочностных свойств в случае уменьшения степени эвтектичности. Исключением является лишь резкое повышение твердости в чугунах из листовой высеки, не согласующееся с повышением других прочностных свойств при модифицировании.

Количественные зависимости, установленные статистической обработкой данных, свидетельствуют не только о преимуществах метода получения синтетического чугуна, но и о существенном влиянии исходных шихтовых материалов на прочностные характеристики сплавов в случае выплавки синтетического чугуна, что необходимо учитывать при оценке технологии и качества металла.

2. ТЕРМОВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА И МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЧУГУНА

Физико-химическая сущность термовременной обработки и модифицирования. Достоинства синтетического чугуна при выплавке его в индукционных печах в полной

мере проявляются только при осуществлении термовременной обработки расплава.

В литературе приводятся примеры успешного применения метода перегрева синтетического чугуна для улучшения его качества, причем отмечается, что при чистых шихтовых материалах и меньшей степени эвтектичности влияние перегрева более существенно. Очевидно, что действие перегрева синтетического чугуна в индукционных печах с кислой футеровкой следует рассматривать во взаимосвязи со многими факторами. Перегрев жидкого чугуна в индукционных печах изменяет не только химический состав, но и жидкое состояние сплава.

Для сплавов железо — углерод — кремний температура, при которой сохраняется твердо-жидкое состояние, на сотни градусов выше температуры ликвидуса [16]. Особенно это характерно для сплавов эвтектического типа, что свидетельствует об устойчивости квазиэвтектической структуры в жидком состоянии. Исключительно устойчивы в расплавах чугуна отдельные образования типа химических соединений, причем особенно устойчивым является, по-видимому, моносилицид железа. Обнаружено изменение структуры ближнего порядка жидкого железа при перегреве, причем имеется в виду не фазовое превращение, а изменение упаковки перманентно существующих группировок сплава, т. е. сохранившейся наследственной структуры. В этом случае изменяются направленность и силы межчастичного взаимодействия, что коренным образом разрушает наследственную структуру и способствует дальнейшему преобразованию сплава при его кристаллизации. Температура, при которой изменяется структура ближнего порядка для сплавов железо — углерод с концентрацией углерода больше 2%, равна приблизительно 1520°С.

Вследствие специфической природы растворения углерода в жидком железе чрезвычайно медленно проходит процесс разрушения прочных пинакоидов графита. В присутствии кремния ослабляются связи железо — углерод из-за сильного взаимодействия между железом и кремнием, поэтому углерод вытесняется из раствора. Наличие в жидком литейном чугуне некоторого количества субмикроскопического графита отмечается во многих работах [16—18, 30—32]. Пинакоиды графита не являются обособленной фазой, они могут отдавать четвертый валент-

ный электрон в электронный газ металлического расплава, образуя макроионы. Поскольку в реальных процессах растворение углерода сопровождается его окислением, можно утверждать, что пинакоиды графита всегда покрыты поверхностными соединениями, преимущественно окислами и сульфидами.

Таким образом, основываясь на данных исследования свойств расплавов железа, железо — углерод и железо — углерод — кремний, следует жидкий чугун характеризовать как дисперсную систему с коллоидной микронеоднородностью, в которой присутствуют группировки с наследственной структурой сплава и графитные образования. Диспергирование фаз при температуре металлургических процессов всегда термодинамически выгодно вследствие возрастания конфигурационной энтропии. Диспергированные фазы постепенно растворяются в дисперсионной фазе и тем быстрее, чем выше температура расплава. Термовременная обработка синтетического чугуна является методом управления степенью дисперсности частиц графита и однородности металлического расплава.

Помимо фактора изменения свойств жидкого сплава при проведении термовременной обработки чугуна в индукционных печах необходимо учитывать взаимодействие расплава с материалом футеровки, шлаками и атмосферой. Поскольку обычно для выплавки синтетического чугуна применяется кислая футеровка, будем рассматривать происходящие процессы применительно к этому случаю. По сравнению с доменными чушковыми чугунами в синтетическом жидком чугуне присутствует гораздо меньшее количество зародышевой фазы, которая состоит как из собственных частиц металлического расплава и графита, так и из чужеродных частиц (кремнезема, глинозема, окиси железа). Одна из причин дезактивации чужеродных зародышей при термовременной обработке — их растворение (табл. 35).

С повышением температуры отрицательное значение свободной энергии реакции образования этих соединений уменьшается, возрастает вероятность их диссоциации. Растворение потенциальных зародышей графита при термовременной обработке не является обратимым процессом. В связи с этим необходимо отметить другую причину дезактивации кремнезема при перегреве — восстановление его углеродом расплава при температурах выше тем-

пературы равновесия реакции. Очевидно, что при одинаковом химическом составе чугуна распределение графита в литом металле тем равномернее, чем мельче частички потенциальных зародышей графита — кремнезема.

Т а б л и ц а 35

T, °K	Изменение свободной энергии, кал/моль		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO
1000	—166,65	—325,2	—47,35
1200	—158,45	—309,4	—43,95
1400	—150,20	—293,8	—40,75
1600	—141,95	—278,8	—37,40
1800	—133,55	—263,1	—34,75

Отклонение системы от равновесия при перегреве и продолжительность этого отклонения должны оказывать определенное влияние на характер распределения графита в литом металле при выплавке его в печах с кислой футеровкой. Можно ожидать, что один и тот же эффект будет достигнут при низкой скорости реакции и длительном времени выдержки или при высокой скорости реакции и малом времени выдержки. В работе [91] предлагается учитывать температуру перегрева (°C) и длительность выдержки (мин) в кислой печи по формуле $\tau(T - T_p)^2$. Когда эта величина больше 6800, то действие термовременной обработки положительно и условия кристаллизации сплава улучшаются.

Зависимость между кристаллизацией чугуна и составом шлака также может быть объяснена взаимодействием шлака и расплава. Поскольку основные шлаки, как и основная футеровка, связывают кислород, количество чужеродных зародышей графита уменьшается, и в данном случае возрастает склонность к метастабильному характеру кристаллизации. Перегрев чугуна в кислых печах способствует растворению частичек кремнезема, при охлаждении они снова выпадают, но уже в виде весьма дисперсных частиц, в результате чего улучшаются распределение и форма графита в литом металле. Отклонение от этих условий приводит к появлению в структуре грубого гра-

фита. Очевидно, что скорость охлаждения расплава после перегрева также оказывает влияние на процесс возникновения и выделения зародышей графита.

Образование высококремнистого шлака на поверхности чугуна при охлаждении вызывает увеличение неметаллических включений в объеме по условиям равновесия расплава со шлаком. При длительной выдержке между жидким чугуном и шлаком устанавливается динамическое равновесие; количество окислов в сплаве стремится к максимуму для имеющейся концентрации кислорода. Следовательно, убыль потенциальных зародышей графита во время перегрева частично можно восполнить медленным охлаждением до возможно низкой температуры заливки.

Помимо образования кремнезема при медленном охлаждении расплава проходит реакция образования сульфида марганца, которая стимулируется понижением температуры вследствие ее экзотермичности. Чем больше содержание марганца в металле, тем больше выделяется сульфида марганца. По опытным данным В. Эльсена, в чугуне с 4% углерода при температуре 1200°С равновесные значения серы составляют 0,06%, марганца — 0,5%. При концентрации марганца, равной 1%, равновесное содержание серы в чугуне равно 0,03%. Поскольку при низких температурах чугун вязкий, то выделившийся сульфид марганца остается в металле.

Таким образом, действие перегрева тем легче зарегистрировать, чем меньше скорость охлаждения расплава. Поэтому высокая температура заливки обуславливает возникновение грубой формы графита, снижая благоприятное влияние перегрева. Практически не всегда возможно осуществить достаточно медленную скорость охлаждения жидкого сплава. Кроме того, увеличение числа зародышей графита в результате медленного охлаждения не компенсирует их убыль при термовременной обработке. Поэтому склонность синтетических чугунов к метастабильной кристаллизации не устраняется.

Для избежания образования карбидов в структуре чугуна необходимо уменьшить степень переохлаждения при данной скорости охлаждения или расширить температурный интервал между стабильным и метастабильным превращениями, так как чем больше этот интервал, тем большая скорость охлаждения допустима без образования карбидов. Поэтому с увеличением содержания кремния угро-

за образования отбела устраняется, однако при этом понижаются механические свойства чугуна.

Чтобы устранить образование карбидов и в то же время получить чугун с высокими механическими свойствами, применяют модифицирование. Увеличение числа зародышей графита уменьшает степень переохлаждения при данной скорости охлаждения.

Необходимо также учесть, что при постоянстве скорости охлаждения и числа зародышей переохлаждение зависит от скорости роста эвтектических зерен, с увеличением которой затвердевание эвтектики протекает с меньшим переохлаждением. Одни примеси (водород, азот, свинец) затормаживают скорость роста эвтектических зерен; другие (церий, торий, лантан) могут нейтрализовать влияние первых.

Графитизирующее модифицирование должно увеличить степень графитизации, измельчить эвтектическое зерно. Увеличение количества зародышей графита приводит к уменьшению переохлаждения, вследствие чего снижается тенденция к междендритной ориентации графита. Это проявляется тем интенсивнее, чем меньше в чугуне потенциальных зародышей графита и чем меньше его эвтектичность.

Действие графитизирующих модификаторов, связанное с изменением жидкого состояния чугуна, необходимо рассматривать во взаимосвязи с другими факторами, влияющими на это состояние (перегревом, выдержкой и т. п.). Оптимальные параметры модифицирования и наилучшие свойства чугуна могут быть получены только в определенных условиях.

На образование и устойчивость зародышей графита влияет температура жидкого чугуна. Высокий перегрев чугуна растрывает имеющиеся в сплаве зародыши и тем самым подготавливает сплав для введения нового типа зародышей и эффективного их воздействия. Но высокий перегрев также быстро дезактивирует вновь введенные зародыши графита, поэтому температура введения модификатора должна быть по возможности низкой, как только это позволяют свойства модификатора и технологические условия. В практике для снижения температуры расплава после термовременной обработки в печь загружают порцию чистой стальной шихты в количестве 10—13% от веса плавки.

Неверным является представление о том, что высокая температура сплава при модифицировании ускоряет в дальнейшем процесс кристаллизации. В связи с образованием большего числа зародышей при графитизирующем модифицировании и меньшим переохлаждением по сечению отливки в процессе кристаллизации действительно наблюдаются небольшой перепад температур и более широкая двухфазная зона. Однако полная продолжительность процесса кристаллизации при модифицировании не изменяется, если состав синтетического чугуна остается постоянным [23].

Результаты исследования действия графитизирующих модификаторов показали, что значение относительной прочности синтетического чугуна наиболее высокое при модифицировании силикокальцием или смесями на его основе. Предел прочности при растяжении возрастает по мере уменьшения степени эвтектичности. В то же время значение относительной твердости понижается, что позволяет обрабатывать отливки из модифицированного чугуна с низкой степенью эвтектичности.

Некоторые исследователи в качестве модификатора применяли графит, однако полученные показатели прочности значительно ниже, чем у чугуна, обработанного кремнийсодержащими ферросплавами.

Модифицирующий эффект в синтетических чугунах сохраняется более длительное время, чем в обычных чугунах. Общий вывод исследований свидетельствует о возможности выплавки в индукционных печах промышленной частоты синтетических чугунов качественных марок с пределом прочности при растяжении свыше 50 дан/мм^2 , если вводить в процесс графитизирующее модифицирование.

Таким образом, термовременная обработка и модифицирование являются доступными и эффективными способами воздействия на жидкий металл при выплавке синтетических чугунов и позволяют успешно получать высококачественный чугун. При этом предпочтительнее графитизирующее модифицирование, что обусловлено особенностями природы синтетического сплава.

Влияние термовременной обработки и модифицирования на свойства чугунов. В общем случае при термовременной обработке нужно стремиться сохранить неизменным химический состав чугуна. Поэтому при оценке ре-

зультатов выдержки и перегрева следует учитывать степень изменения концентраций компонентов сплавов.

Сравнительно длительная выдержка жидкого чугуна при низких температурах не сопровождается каким-либо значительным изменением химического состава. При этом форма и характер распределения графита в литых образцах остаются примерно одинаковыми. Количество связанного углерода несколько увеличивается, что, по-видимому, способствует некоторому, хотя и незначительному, повышению прочности чугуна. Практически следует принять, что выдержка расплава при низких температурах не оказывает влияния на прочностные свойства литого металла.

Для изучения влияния температуры перегрева на структуру и механические свойства обычного и синтетического чугунов в индукционной печи промышленной частоты емкостью 6 т сплавы последовательно перегревались до температур 1350, 1400, 1450, 1500 и 1550° С. После достижения требуемой температуры чугун выдерживался в печи в течение 10 мин, а затем отбиралась необходимая для заливки образцов порция металла. Температура заливки образцов была равна 1350—1380° С. В качестве шихтовых материалов использовались чугуновая стружка и обрезь динамной стали. Химический состав сплавов и вид обработки приведены в табл. 36. Под перегревом при

Таблица 36

Шихта	Номер сплава	S_c	Химический состав, %				Модифицирование Си 75, %
			C	Si	Mn	S	
Чугунная стружка	1	1,04	3,70	2,32	0,58	0,12	—
	2	1,00	3,60	2,25	0,61	0,11	—
	3	0,93	3,26	2,50	0,57	0,10	—
	4	0,94	3,50	1,81	0,55	0,11	0,4
	5	0,90	3,28	1,95	0,61	0,10	0,5
Обрезь динамной стали	6	1,03	3,76	2,12	0,37	0,06	—
	7	0,99	3,52	2,34	0,41	0,06	—
	8	0,95	3,43	2,27	0,36	0,06	—
	9	0,96	3,52	2,06	0,32	0,05	0,5
	10	0,90	3,34	1,80	0,37	0,05	0,5
	11	0,78	2,96	1,65	0,34	0,06	0,65

обсуждении экспериментальных данных подразумевается температура сплавов по шкале Цельсия.

Перегрев от 1350 до 1550° С немодифицированного чугуна, выплавленного на основе чугуновой стружки, вызы-

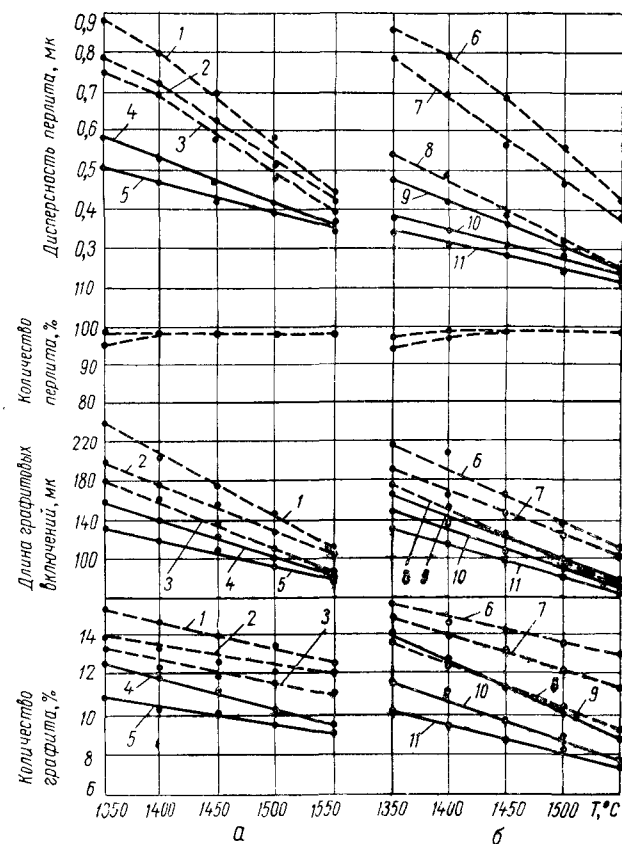


Рис. 56. Влияние перегрева на характеристики структуры модифицированных (сплошные линии) и немодифицированных (пунктирные линии) чугунов, выплавленных в индукционной печи на основе чугуновой стружки (а) и обрезки динамной стали (б) (номера кривых соответствуют номерам сплавов в табл. 36).

вает постепенное и равномерное снижение количества графита в структуре (рис. 56). При этом существенно изменяются характеристики включений графита. С увеличением

температуры перегрева длина пластинок графита резко уменьшается; форма графита — пластинчатая, средnezавихренная, с перегревом появляется значительное количество компактных включений. Пересекающиеся и малоизолированные включения с наличием образований розеточного типа в исходном чугуна сменяются более изолированными пластинками. Исключительно эффективно действует перегрев на уменьшение толщины пластинок перлита, повышая его дисперсность почти вдвое. При этом однородность перлитных областей в сечении шлифа возрастает, чугун становится более плотным.

Перегрев от 1350 до 1550° С синтетического чугуна, выплавленного из обрезки динамной стали, действует сильнее, чем перегрев обычного чугуна. С увеличением температуры перегрева количество графита и длина его пластинок уменьшается, причем с уменьшением эвтектичности чугуна более интенсивно. Длинные и завихренные включения уступают место компактным и точечным образованиям. Встречавшиеся в некоторых местах исходного чугуна характерные скопления графита исчезают, а его включения относительно равномерно распределяются по всему полю шлифа. Наблюдается склонность к междендритному расположению включений графита.

С увеличением температуры перегрева дисперсность перлита в синтетическом чугуна возрастает быстрее, чем в обычном чугуна. В синтетическом чугуна, как и в обычном, при температурах перегрева выше 1400° С замечается интенсивное возрастание дисперсности перлита. Улучшается однородность перлита по сечению образца.

Модифицирование обычного чугуна без предварительного перегрева не оказывает заметного влияния на структуру чугуна и характеристики графитовых включений. С повышением температуры перегрева и с последующим модифицированием длина графитовых включений монотонно уменьшается, улучшается форма и распределение графита. Пластинчатый средnezавихренный графит розеточного расположения переходит в изолированный и малоизолированный с прямолинейными и компактными образованиями. Пластинки перлита размельчаются и относительно однородно распределяются в сечении шлифа. Эксперименты проводились на сплавах с эвтектичностью 0,90—0,94. Колебания химического состава металла в экспериментах были небольшими и не оказывали заметного

влияния на структуру и свойства чугунов. Прочностные свойства модифицированных чугунов индукционной плавки с повышением температуры перегрева возрастают (рис. 57). Термовременная обработка более заметно влияет на свойства синтетических чугунов, чем обычных.

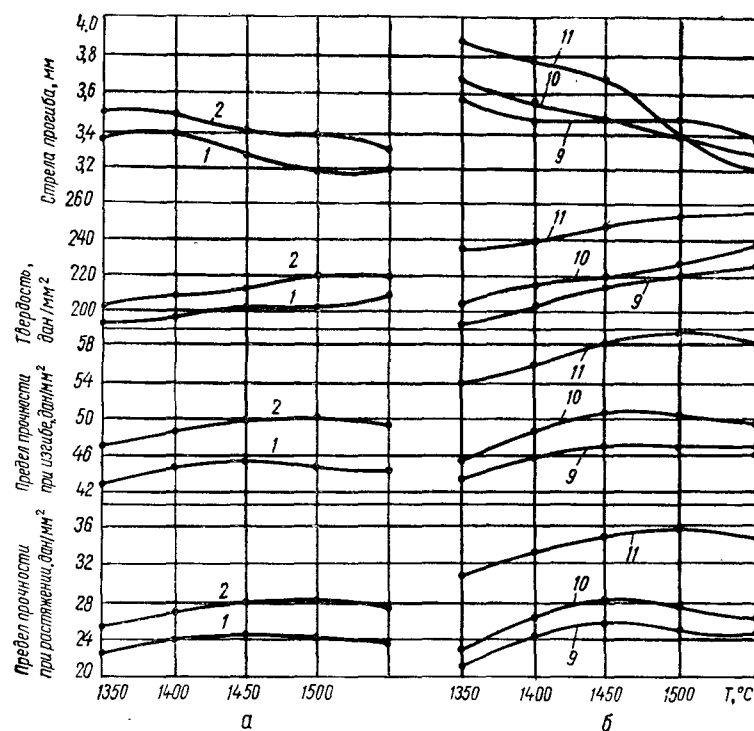


Рис. 57. Влияние температуры перегрева на свойства модифицированных чугунов, выплавленных в индукционной печи на основе чугунной стружки (а) и обрезки динамной стали (б) (номера кривых соответствуют номерам сплавов в табл. 36).

Необходимо также отметить, что в синтетическом чугуна при модифицировании образуются совершенно изолированные, прямолинейные и компактные включения графита (Гр1, Гф1), равномерно распределенные по сечению образца, чего нельзя сказать в отношении обычного чугуна, в котором всегда наблюдаются контактирующие и слабозавихренные пластинки (Гр4, Гф2).

Влияние перегрева и модифицирования на качество чугунов, выплавленных из различных шихтовых материалов, необходимо увязывать с изменением содержания и природы зародышевой фазы, а также с изменением процесса кристаллизации чугуна. Из результатов проведенных исследований видно, что в связи с прогрессирующим растворением зародышей перегрев вызывает уменьшение степени графитизации чугуна и повышение дисперсности перлита. Появление критической температуры перегрева, выше которой наблюдается склонность к междендритной ориентации включений, связана, очевидно, с общей диссоциацией присущих данному чугуну зародышей графита и резким увеличением переохлаждения при эвтектической кристаллизации. Действие перегрева на зародышевую фазу в синтетическом чугуне проявляется при меньших температурах, чем в обычных чугунах. Эффект глубокого переохлаждения и ориентации графитовых включений наступает раньше.

Если сравнить характеристики структуры графита и матрицы немодифицированных и модифицированных чугунов при перегреве, то очевидно, что в основном на изменение этих параметров влияет перегрев металла, модифицирование в данном случае больше влияет на характер распределения и форму графита. Однако надо отметить, что при одной и той же температуре перегрева эффект модифицирования в синтетическом чугуне проявляется сильнее, чем в обычном. Характеристики структуры металлической основы синтетического чугуна лучше, что в большей мере обусловлено характеристиками исходных материалов, чем модифицированием, так как при модифицировании количество графита в чугунах различного происхождения в зависимости от степени эвтектичности уменьшается практически так же, как и в немодифицированных. Длина графитовых включений в модифицированных чугунах несколько больше, чем в синтетических. Надо отметить, что в модифицированных чугунах по сравнению с немодифицированными длина графита меньше зависит от степени эвтектичности.

Химический состав чугуна влияет, разумеется, на появление той или иной формы графита. Поскольку увеличение содержания кремния, повышая активность углерода, облегчает образование графита, он начинает выделяться сравнительно быстро даже при значительной склонности

расплава к переохлаждению. Поэтому влияние фосфора следует признать положительным, так как он способствует графитизации чугуна и размельчению эвтектического зерна.

При увеличении эвтектичности обычного чугуна количество и форма выделяющегося при охлаждении графита изменяются. Вследствие этого изменяется состав аустенита, а концентрация углерода в нем становится менее равномерной, чем в синтетическом чугуне. Неоднородность аустенита по углероду и кремнию усиливается также и вследствие затруднения диффузии углерода. Поэтому в обычных чугунах наблюдается некоторая неоднородность перлитной основы чугуна. В немодифицированном синтетическом чугуне, в котором выделение и образование графитной составляющей из-за отсутствия достаточного количества зародышей сильно задерживается во времени по сравнению с выделением и ростом первичного аустенита, структура перлитной матрицы однородна. Понижение температуры превращения аустенита, а также повышение концентрации марганца, хрома и других элементов, увеличивающих устойчивость переохлажденного аустенита, вызывает повышение дисперсности перлита. С увеличением содержания углерода и повышением степени эвтектичности устойчивость аустенита снижается.

Отсутствие в синтетическом чугуне примесей, не растворимых в железе и скапливающихся перед фронтом кристаллизации первичного аустенита, обуславливает чистоту границ перлитных зерен металлической основы и прочный контакт между ними, что вызывает повышение прочностных свойств синтетического чугуна по сравнению с обычным, в котором связь между отдельными зернами матрицы неполная. С повышением дисперсности и однородности перлита повышаются твердость и прочность металлической основы синтетических чугунов.

В приведенных выше опытах по определению влияния перегрева модифицированные синтетические чугуны имели сравнительно невысокие прочностные свойства вследствие большей степени эвтектичности исходных сплавов. Условия проведения экспериментов не позволяли осуществить модифицирование при благоприятных для этого температурах. Некоторое исключение составляет чугун № 11, который имел в исходном состоянии степень эвтектичности, равную 0,78, и содержание кремния 1,65%. Этот

сплав имеет относительно высокие прочностные свойства, которые соответствуют маркам СЧ32-52 и СЧ35-56.

В результате модифицирования сплавов с низкой степенью эвтектичности ферросилицием и силикокальцием синтетические чугуны приобретают стабильно высокие прочностные свойства (табл. 37). Содержание кремния, приведенное в табл. 37, соответствует концентрации его в литом образце.

Таблица 37

Содержание элементов, %			$\sigma_{изг.}$ дан/мм ²	$\sigma_{в.}$ дан/мм ²	НВ, дан/мм ²	Модификатор
С	С связанный	Si				
3,26	0,98	1,69	52,3	34,2	235	0,3 Си75
	0,93	1,77	54,8	35,1	241	0,4 Си75
	0,88	1,83	53,7	36,4	241	0,5 Си75
	0,91	1,88	56,6	36,7	248	0,6 Си75
	0,84	1,95	55,9	35,3	241	0,7 Си75
3,08	1,06	1,72	49,6	31,9	241	0,4 Си75
	0,97	1,70	51,4	32,3	229	0,4 Си75
	0,89	1,83	53,7	34,8	235	0,6 Си75
	0,86	1,96	54,2	36,1	235	0,8 Си75
3,16	1,16	1,78	53,1	34,7	248	0,4 КаСи
	1,07	1,82	56,7	35,4	235	0,5 КаСи
	0,94	1,88	58,3	38,2	229	0,6 КаСи
	0,99	1,93	55,4	36,3	235	0,7 КаСи
	0,85	1,98	56,5	37,1	229	0,8 КаСи

Плавки проводили по следующей методике. Расплав с содержанием кремния 1,60—1,70% перегревали до температуры 1550°С, затем в печь загружалась последняя порция стальной шихты в количестве 10—12% от веса плавки. После расплавления порции шихты температура жидкого металла понижалась до 1400°С, а концентрация кремния в чугуне составляла около 1,5%. Этот чугун использовали как исходный для модифицирования.

Модификаторы вводились в количестве 0,1—0,8% от веса металла в мелкораздробленном виде при температуре 1400—1420°С под струю металла. Усвоение кремния

составляло 80—85% введенного с лигатурой количества. Модифицирование чугунов с низким содержанием кремния, обычно затвердевающих белыми, приводит к устойчивому получению перлитной структуры чугунов без отбела. Количество связанного углерода приближается к эвтектоидному с увеличением количества вводимого модификатора.

В работе [37] исследовалось влияние термовременной обработки и модифицирования на механические и литейные свойства синтетического и ваграночного чугунов. Синтетический чугун выплавляли из отходов стали Ст. 3 в кислой индукционной печи, емкостью 50 кг. В качестве карбюризатора в твердую завалку добавляли электродный порошок, для доводки использовали ферросилиций Си 75.

При модифицировании силикокальцием синтетического чугуна, содержащего 3,40% углерода, 1,0% кремния, 0,31% марганца, 0,02% серы и 0,03% фосфора, было обнаружено, что максимум прочности наблюдается при введении 0,6—0,7% силикокальция (содержание кремния в чугуне повышалось на 0,30—0,35%). С дальнейшим увеличением количества модификатора предел прочности при растяжении и жидкотекучесть чугуна снижаются. Удельная вязкость, твердость и глубина отбела чугуна остаются практически на одном уровне при вводе 0,1% модификатора, причем глубина отбела уменьшается по сравнению с исходным чугуном почти в три раза.

Влияние времени выдержки металла после модифицирования на свойства чугуна выявить не удалось, так как объем обрабатываемого металла был мал. По данным работы [101] максимум механических свойств при модифицировании силикокальцием наблюдался через 6—10 мин после присадки в металл с температурой 1400°С.

Влияние термовременной обработки и модифицирования изучали на синтетических и ваграночных сплавах, химический состав которых приведен в табл. 38, А. Сплавы перегревали до температур 1450, 1500, 1550, 1600 и 1650°С, выдерживали при каждой температуре 3 мин, охлаждали до 1450°С, модифицировали 0,6% силикокальция и разливали при 1400°С. Максимальная прочность чугунов обнаруживается после обработки при 1500—1550°С, кроме высокоуглеродистого сплава 3с, близкого по химичес-

кому составу к эвтектическому, прочность которого понижается с повышением перегрева (рис. 58).

Ударная вязкость и твердость чугуна 3с также снижаются с перегревом в отличие от других сплавов, что еще раз свидетельствует о влиянии химического состава.

Различный уровень температурной обработки практически не изменяет твердость сплавов, очевидно, вследствие эффекта модифицирования и

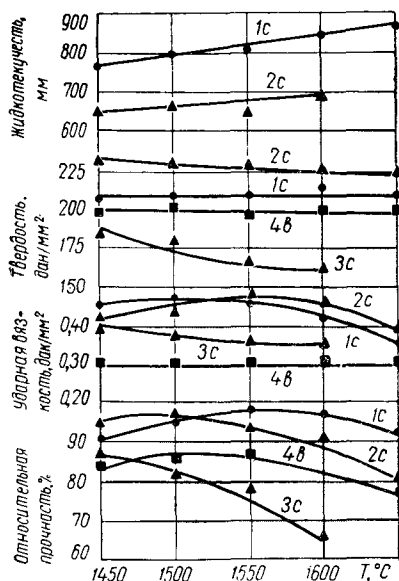


Рис. 58. Зависимость механических и литейных свойств модифицированных сплавов от температуры перегрева (номера кривых соответствуют номерам сплавов в табл. 38А).

одинаковой температуры заливки образцов. Жидкотекучесть сплавов 1с и 2с с повышением температуры перегрева увеличивается. Глубина отбела при перегреве чугунов выше 1600° С несколько увеличивается.

Влияние высокотемпературной выдержки на свойства сплавов изучали на доэвтектических чугунах (табл. 38, Б). Выдержка производилась при температуре 1550° С, модифицирование и разливка — так же, как и в предыдущем опыте. Оптимальная выдержка для этих сплавов ока-

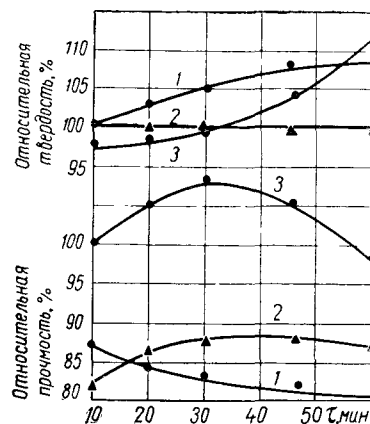


Рис. 59. Влияние высокотемпературной выдержки (1550° С) на свойства сплавов при последующем модифицировании (номера кривых соответствуют номерам сплавов в табл. 38Б).

залась различной (рис. 59). Это, очевидно, связано с различным содержанием кремния в сплавах, которое можно характеризовать отношением $\frac{Si}{C}$. С увеличением значения отношения $\frac{Si}{C}$ относительная прочность чугуна при оди-

Таблица 38

Номер сплава	Химический состав, %					Степень эвтектичности, %	Отношение $\frac{Si}{C}$
	C	Si	Mn	S	P		
А. 1с	3,62	1,05	0,28	0,015	0,03	0,92	0,29
2с	3,65	1,65	0,31	0,020	0,03	0,81	0,45
3с	3,89	0,80	0,28	0,020	0,03	0,98	0,21
4в	3,34	2,37	0,37	0,070	0,17	0,96	0,71
Б. 1	3,59	0,70	0,30	0,036	0,03	0,89	0,20
2	3,37	1,02	0,28	0,030	0,03	0,85	0,30
3	3,41	1,49	0,24	0,028	0,03	0,89	0,44

наковой степени эвтектичности выше (см. табл. 38, сплавы 1 и 3). Таким образом, можно полагать, что оптимальная температура перегрева для доэвтектических чугунов лежит в области 1500—1550° С и должна определяться для каждого конкретного случая с учетом химического состава и модифицирования.

3. ПОЛУЧЕНИЕ ЧУГУНОВ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКЕ

Существенный недостаток плавки чугуна в индукционных электропечах промышленной частоты (также и в канальных печах) при непрерывном режиме работы — трудность получения чугунов различных марок вследствие наличия в тигле печи пускового объема металла («болота»). В современном же производстве обычно велика номенклатура отливок, заливаемых чугунами разных марок в течение дня.

Получить чугун нескольких марок можно изменением состава шихты, металлургических процессов плавки, состава металла в жидком состоянии, доводкой в другом

плавильном агрегате, а также легированием или модифицированием жидкого металла.

На основании экспериментального материала и практического опыта сформулированы рекомендации по выплавке чугуна различных марок при использовании стальной и чугунной стружки, обрезки динамной стали. При этом исходили из условия обеспечения наряду с хорошими литейными и прочностными свойствами сплавов возможно низкой температуры перегрева жидкого металла для уменьшения износа футеровки. Чугунную стружку целесообразно использовать для получения низкомарочных чугунов — СЧ15-32, СЧ18-36, СЧ21-40. Шихта, состоящая из стальной и чугунной стружки в равных количествах, хорошо подходит для получения марок чугуна СЧ18-36 и СЧ21-40. Синтетические чугуны, выплавленные на основе стальной стружки и обрезки динамной стали, имеют хорошее сочетание прочностных и литейных свойств. Высокие марки чугуна легко достигаются модифицированием, что обусловлено особенностями природы жидкого синтетического сплава и закономерностями его кристаллизации. Следовательно, для получения одной и той же марки синтетические чугуны могут иметь большую степень эвтектичности и меньшую температуру перегрева, что выгодно отличает их от обычных чугунов.

Очевидно, что в общем случае технологичным и простым методом получения нескольких марок металла является обработка чугуна в разливочном ковше. При наличии в литейном цехе нескольких печей с жидким металлом различного химического состава, что неизбежно бывает при выплавке чугуна в тигельных индукционных печах из вторичных материалов, появляется возможность широко применять жидкое модифицирование, суть которого заключается в прибавлении к белому чугуну серого в количестве 30—40%. Жидкое модифицирование не требует использования ферросплавов. Механизм процессов, происходящих при смешивании жидких металлов, недостаточно ясен. В настоящее время принята флуктуационная теория, объясняющая многие аспекты этого вопроса [55]. При сливании чугунов различного химического состава происходит не только простое их смешивание, но и протекают сложные процессы взаимного растворения и возникновения флуктуаций отдельных элементов, приводящие к графитизации чугуна при затвердевании.

Таблица 39

Марка чугуна	Стальная стружка		Обрезь динамной стали		Чугунная стружка	
	Степень эвтектичности, %	Температура перегрева, °С	Степень эвтектичности, %	Температура перегрева, °С	Степень эвтектичности, %	Температура перегрева, °С
Немодифицированный	—	—	1,05—1,09	1420	1,01—1,06	1430
	—	—	1,01—1,05	1450	0,97—1,01	1440
	—	—	0,97—1,01	1450	0,92—0,97	1450
	—	—	0,90—0,97	1450	0,86—0,92	1450
Модифицированный	0,92—0,97	1450	0,92—0,99	1460	0,89—0,94	1470
	0,90—0,97	1450	0,92—0,99	1470	0,84—0,89	1500
	0,85—0,90	1470	0,82—0,86	1500	—	—
	0,81—0,85	1500	0,77—0,82	1500	—	—
	0,77—0,81	1550	0,74—0,77	1550	—	—

Центры графитизации могут образовываться за счет уже имеющихся в расплаве комплексов графита и вне- сения серым чугуном зародышей, количество которых больше, чем в белом чугуне. В белом чугуне величина критического размера зародыша больше, чем в сером, вследствие меньшей концентрации углерода и большего межфазного поверхностного натяжения.

Сливаемые вместе чугуны при различных температурах и химическом составе имеют неодинаковые области существования твердо-жидкого состояния и неравноценные термодинамически выгодные размеры диспергированных фаз. Совместное существование двух растворимых друг в друге сплавов возможно только при переходе к некоторому третьему осредненному состоянию, причем два исходных расплава оказываются как бы неравновесными системами по отношению к получаемому расплаву. Переход к осредненному состоянию сопровождается перестройкой ближнего порядка исходных сплавов и активизацией потенциальных зародышей. В этих условиях при последующем охлаждении сплава инициируются кристаллизация чугуна и образование графитных включений.

В результате изотермической выдержки жидкого металла получается динамически равновесный осредненный сплав, модифицирующий эффект слияния исчезнет. Поэтому необходимо выбирать определенный интервал времени от сливания металлов до заливки, чтобы проявилось модифицирующее действие смешивания. Поскольку флуктуации концентрации отдельных элементов возникают практически во время сливания, то интервал времени до заливки должен быть меньше, чем при модифицировании посредством лигатур, когда необходимо дополнительное время для расплавления и растворения вводимой лигатуры. Поэтому интервал времени до заливки чугуна в формы после сливания металлов был выбран равным 3 мин.

Для определения интенсивности модифицирующего влияния смешивания было проведено несколько опытных сливаний жидких чугунов. Вес добавляемого серого чугуна составлял 30—40% веса белого чугуна. Температуры сливаемых чугунов были различны и колебались в зависимости от хода плавки в широких пределах. В табл. 40 каждый третий сплав получен сливанием двух предыдущих. Из приведенных данных видно, что сливание близких по химическому составу чугунов даже при

различных температурах не дает модифицирующего эффекта вследствие близости физико-химических свойств расплава и активности компонентов.

Таблица 40

Температура металла, °C	Содержание элементов, %		$\sigma_{изг.}$ дан/мм ²	$\sigma_{в.}$ дан/мм ²	$HВ.$ дан/мм ²
	C	Si			
1430	3,73	2,13	33,8	21,4	235
1450	3,68	2,07	37,2	21,1	217
—	3,66	2,11	38,4	21,8	217
1420	3,26	1,52	—	—	—
1450	3,61	2,12	—	—	—
—	3,37	1,62	54,3	33,2	229
1400	3,08	1,47	—	—	—
1300	3,31	2,27	—	—	—
—	3,14	1,78	55,6	34,8	235
1400	3,16	1,55	—	—	—
1260	3,08	2,16	—	—	—
—	3,11	1,74	49,6	31,9	223
1500	2,87	1,49	—	—	—
1250	3,36	1,93	—	—	—
—	3,06	1,62	56,3	34,2	235

Различие в концентрации хотя бы одного из основных элементов (в частности, кремния) приводит к появлению положительного эффекта смешивания. Но в полной мере модифицирующий эффект появляется при смешивании жидких чугунов с различным содержанием кремния и углерода, когда температура белого чугуна выше, чем температура серого чугуна. Модифицированный белый чугун затвердевает, как серый, количество связанного углерода находится в пределах перлитной области, механические свойства литого чугуна относительно высокие. Таким образом, жидкое модифицирование может быть с успехом применено при одновременной работе нескольких тигель-

ных индукционных печей, выплавляющих различных по химическому составу чугуны.

Наиболее широкое распространение получила обработка чугуна кремнийсодержащими ферросплавами — ферросилицием и силикокальцием. В параграфе 1 данной главы на основе статистической обработки экспериментальных данных была определена взаимосвязь механических свойств модифицированных чугунов, полученных из различных шихтовых материалов, и степени эвтектичности, которая обычно принимается в качестве параметра для расчета прочности чугуна (формулы Колло, Бринкмана и Тобиаса, Шнейдевинда и Элви, Н. Г. Гиршовича и др.). В данном случае степень эвтектичности была подсчитана по формуле Зиппа и Гейне. В этом виде она представляет собой математическое выражение проекции эвтектической линии на базисную плоскость диаграммы состояния тройных сплавов железо — углерод — кремний. Сравнивая эти зависимости для синтетических и обычных чугунов, видим, что прочность синтетических чугунов выше, чем обычных, но несколько сильнее зависит от химического состава.

Многочисленными экспериментальными работами выявлено, что графитизация чугуна, а следовательно, и его прочность, не являются функцией только эвтектичности, но зависят также от соотношения кремния и углерода в пределах одной степени эвтектичности. Поэтому целесообразно найти зависимость свойств литого модифицированного чугуна от величины соотношения кремния и углерода. Эффективность модифицирования возрастает при увеличении отношения кремния к углероду в литом металле в пределах одной степени эвтектичности. Например, по данным работ [82, 83] при отношении кремния к углероду в литом металле, равном 0,9, и степени эвтектичности 0,80 предел прочности чугуна на разрыв был равен 52 дан/мм^2 . В качестве модификатора применяли силикокальций, литые образцы чугуна имели перлитную структуру, отбела не наблюдалось. Таким образом, получение различных марок чугуна можно обеспечить правильным выбором химического состава, термовременной обработки и модифицирования простыми ферросплавами. В работе [19] предлагается получать высококачественный чугун снижением концентрации кремния в жидком чугуне до 1% одновременно с перегревом до 1550° С и последую-

ющим модифицированием. Следует, однако, обратить внимание на опасность быстрого износа кислой футеровки печи. Стойкость футеровки в печах промышленной частоты пока еще недостаточна, поэтому технологический процесс должен строиться так, чтобы способствовать уменьшению износа футеровки.

Зависимости предела прочности при растяжении и изгибе от соотношения кремния и углерода в чугуне по экспериментальным данным в первом приближении могут быть представлены линейными функциями:

$$\Delta\sigma_{\text{в}} = 15 \left| \Delta \frac{\text{Si}}{\text{C}} \right| [\text{дан/мм}^2]; \quad (57)$$

$$\Delta\sigma_{\text{изг}} = 32 \left| \Delta \frac{\text{Si}}{\text{C}} \right| [\text{дан/мм}^2]. \quad (58)$$

Увеличение предела прочности чугуна при растяжении по абсолютной величине меньше увеличения прочности чугуна при изгибе в $\frac{15}{32} = 0,47$ раза. Эта величина близка известному отношению предела прочности стали при растяжении к пределу текучести, что свидетельствует о связи параметра $\frac{\text{Si}}{\text{C}}$ также с прочностью металлической основы чугуна. Эвтектическое зерно при низкой степени эвтектичности чугуна мельче, чем при высокой степени эвтектичности. Такое различие между модифицированными чугунами разной степени эвтектичности тем больше, чем больше значение отношения кремния к углероду.

Полученные количественные зависимости прочности модифицированного чугуна от степени эвтектичности и величины отношения кремния к углероду можно использовать для расчета химического состава чугуна по заданной его прочности и наоборот. Если найти линии одинаковой прочности в координатах углерод — кремний, то получим семейство гипербол, параметры которых зависят от химического состава сплавов. Подобный гиперболический характер линий изопрочности для модифицированного чугуна получили также Н. Г. Гиршович и А. Я. Иоффе [22]. Качественное совпадение результатов указывает на то, что в данном приближении соблюдается принцип аддитивности влияния степени эвтектичности и отноше-

ния кремния к углероду, а полученные частные зависимости можно использовать совместно для номографических расчетов прочности модифицированного синтетического чугуна. Для упрощения номограммы была произведена анаморфоза линий изопрочности с целью их выпрямления (рис. 60).

Ценными эксплуатационными качествами обладают низколегированные синтетические чугуны, особенно при

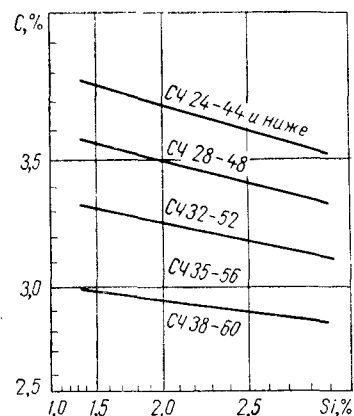


Рис. 60. Номограмма прочности модифицированных синтетических чугунов, выплавленных из стальной стружки в индукционных печах промышленной частоты.

комбинировании модифицирования и легирования. В Институте проблем литья АН УССР разработан, например, состав комплексной лигатуры, в которой легирующие и модифицирующие элементы (хром, кремний, кальций, алюминий) находятся в оптимальном соотношении [63]. Обработка низкомарочного чугуна хром-кремнийкальциевой лигатурой вызывает согласованное повышение его механических свойств. При этом существенно уменьшаются склонность к отбеливанию, а также различие структуры и свойств в сечениях отливок. Микроструктура обработанного чугуна — перлитная, с равномерно распределенными включениями пластинчатого и компактного графита. Как показали результаты экспериментов, колебания химического состава чугуна исходной марки, неизбежные при плавке, не оказывают заметного влияния на свойства обработанного чугуна. Эффективность действия комплексной лигатуры, вводимой в перегретый чугун при температуре от 1300 до 1500°С, сохраняется достаточно стабильно в связи с хорошей растворимостью и усваиваемостью лигатуры. Количество кремния и хрома, усвоенных при введении лигатуры до 3% в жидкий чугун с температурой 1400°С, составляет 90% и выше, что недостижимо при введении отдельно феррохрома или силикокальция.

Хромкремнийкальциевая лигатура рекомендуется для ковшевой обработки доэвтектического чугуна при изготовлении фасонных отливок, которые должны иметь высокие механические свойства и повышенное сопротивление износу.

Синтетические сплавы — наилучший исходный материал для производства чугуна с шаровидным графитом, одного из наиболее ценных и перспективных конструкционных материалов, который с успехом применяют для изготовления сложных и высоконагруженных деталей. В зависимости от химического состава и структуры прочность чугуна с шаровидным графитом может достигать 150 даН/мм². Для ферритного чугуна достигнуто значение удлинения — 26%.

Параметры жидкого состояния сплава являются одним из решающих факторов кристаллизации графита в шаровидной форме. В синтетическом чугуне можно получить шаровидный графит без применения сфероидизирующих добавок. В результате плавки металла под наводимыми в печи основными и нейтральными шлаками при определенных температурах и интенсивности электромагнитного перемешивания жидкий чугун приобретает физико-механические свойства, необходимые для образования в нем шаровидного графита: высокое значение величины поверхностного (межфазного) натяжения, низкий уровень газонасыщенности и достаточную степень переохлаждения при последующей кристаллизации в форме. Шлаковым режимом можно регулировать также характер металлической основы чугуна в литом состоянии (преобладание в ней ферритной или перлитной составляющей) [48].

Многие зарубежные фирмы внедрили выплавку синтетического чугуна с шаровидным графитом, используя возможность получения сплавов с низким содержанием демодифицирующих элементов, дешевые шихтовые материалы и эффективность модифицирования. Магнием или лигатурами можно обработать всего лишь 25—30% жидкого чугуна, потребного на отливку, остальное количество добавляется из печи и перемешивается, после чего производится вторичное модифицирование ферросилицием и разливка [99].

Для производства чугуна с шаровидным графитом в Институте проблем литья АН УССР создан ряд комплекс-

ных модификаторов в виде лигатур (КМ) и механических смесей (КС), выпускаемых Челябинским электрометаллургическим комбинатом и Никопольским ферросплавным заводом по техническим условиям ЧМТУ 5-25-69.

Рекомендации по составу модификаторов, технологии применения и другим данным, необходимым для практической работы, освещены в литературе по производству чугуна с шаровидным графитом [20, 34 и др.].

Синтетический чугун с шаровидным графитом широко применяется для производства деталей гидравлических и прессовых машин, арматуры для номинальных давлений до 40 дан/см^2 и рабочей температуры 400—500° С, деталей мощных моторов, в том числе втулок цилиндров и коленчатых валов [88]. В настоящее время, например, к свойствам чугуна, из которого изготавливаются детали мощных дизелей, предъявляются повышенные требования: он должен обладать минимальной прочностью при растяжении 30 дан/мм^2 и удлинением более 2% при сохранении других положительных свойств (способность поглощать вибрации, низкая чувствительность к надрезам, высокая теплопроводность, хорошие антифрикционные свойства и обрабатываемость). Повышать прочность чугуна, используемого для дизельных деталей, путем понижения степени эвтектичности нецелесообразно, так как резко снижается однородность чугуна в различных сечениях. Уменьшать величину соотношения углерода и кремния также нежелательно вследствие уменьшения теплопроводности и ухудшения антифрикционных свойств чугуна. Исследование свойств различных чугунов позволило установить, что наилучшим материалом для изготовления цилиндров и коленчатых валов мощных дизелей является синтетический чугун с шаровидным графитом без избыточного содержания магния.

1. Бабилус В. В., Моцкайтис И. И., Жельнис М. В. Науглероживание и десульфурация синтетического чугуна, выплавленного в печах промышленной частоты.— Литейное производство, 1968, 7, 26.
2. Бабилус В. В., Жельнис М. В. и др. Футеровка индукционных печей из кварцевого песка.— Литейное производство, 1968, 4, 16—18.
3. Баранов А. А. О механизме растворения графита в железе.— Изв. АН СССР. Металлы, 1965, 2, 25.
4. Брокмайер К. Г. Индукционные печи в литейном производстве.— В кн.: 24-й Международный конгресс литейщиков. ГНТИМЛ, М., 1960.
5. Бурyleв Б. П. Растворимость углерода в расплавленных металлах четвертого периода.— Изв. вузов СССР. Черная металлургия, 1961, 6, 20—24.
6. Бурyleв Б. П. Влияние добавленных элементов на растворимость углерода в жидком железе.— Изв. вузов СССР. Черная металлургия, 1964, 3.
7. Вайнберг А. М. Индукционные плавильные печи. Госэнергоиздат, М., 1960.
8. Вертман А. А., Самарин А. М. О кинетике растворения углерода в жидком железе.— Изв. АН СССР, Металлы. 1965, 1, 46—50.
9. Вертман А. А. и др. Исследование заэвтектической части диаграммы железо—углерод.— В кн.: Вопросы термодинамики и физической кинетики структурообразования в чугуне и стали. Изд. ТПИ, Тула, 1964, 15—20.
10. Вертман А. А., Самарин А. Н. О строении жидких эвтектик.— Изв. АН СССР. Металлургия и топливо, 1960, 3, 17—20.
11. Вертман А. А. О состоянии углерода в жидком чугуне.— ДАН СССР, 1960, 3, 134, 629—631.
12. Вертман А. А. Плотность сплавов железо—углерод.— Изв. вузов СССР. Черная металлургия, 1964, 7, 17—23.
13. Вертман А. А. Микрогетерогенность металлических расплавов и проблема регулирования свойств отливок.— Физика и химия обработки материалов, 1967, 3, 132—141.
14. Вертман А. А. Физико-химические свойства металлических расплавов.— В кн.: Физико-химические основы металлургических процессов. Металлургиздат, М., 1964, 86—96.
15. Вертман А. А., Самарин А. М. Строение и свойства жидких сплавов железа с углеродом.— В кн.: Вопросы термодинамики и физической кинетики структурообразования в чугуне и стали. Изд. ТПИ, Тула, 1964, 8—13.

16. Вертман А. А., Самарин А. М. Свойства расплавов железа. «Наука», М., 1969.
17. Вертман А. А., Самарин А. М. Термохимия металлов на основе железа и никеля.—Металлы, 1966, 3, 19.
18. Вертман А. А., Самарин А. М. Строение и свойства жидких металлов.—В кн.: Труды ИМЕТ, вып. 10. Изд-во АН СССР, 1962.
19. Виноградов Ю. Г. и др. Карбюризатор для синтетического чугуна.—Литейное производство, 1968, 7, 27.
20. Волощенко М. В. Получение чугуна с шаровидным графитом при использовании комплексных модификаторов. УкрНИИТИ, К., 1968.
21. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. Машиностроение, М., 1967.
22. Гиршович Н. Г., Иоффе А. Я.—В кн.: Вопросы теории литейных процессов. ГНТИМЛ, М., 1960.
23. Гиршович Н. Г., Нехендзи Ю. А. Влияние модифицирования на кристаллизацию сплавов.—Литейное производство, 1962, 5, 19—25.
24. Горшков А. А. и др. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна. ГНТИМЛ, М., 1961.
25. Горшков А. А., Волощенко М. В. Литые коленчатые валы. Машиностроение, М., 1964.
26. Ефимов В. А. и др. Интенсификация процесса плавки и рафинирования металла в индукционных печах.—Технология и организация производства, 1969, 1, 48—50.
27. Жуков А. А. О влиянии кислорода на растворимость углерода в жидком чугуне.—Литейное производство, 1966, 1, 24—28.
28. Зубер Н.—В кн.: Тепло- и массоперенос. «Наука и техника», Минск, 1963 (перевод с английского).
29. Иванов Д. П. и др. Подготовка шихты для индукционной плавки синтетического чугуна.—Литейное производство, 1968, 1, 42.
30. Иванов Д. П. О первичных факторах формирования структуры и свойств чугуна.—Литейное производство, 1962, 9, 1—6.
31. Иванов Д. П. Проблемные вопросы металлургии чугуна.—Физика и химия обработки металлов, 1967, 3, 147—157.
32. Иванов Д. П.—В кн.: Получение отливок из высокопрочного чугуна. Изд-во АН УССР, М., 1955.
33. Иванов Д. П., Кульбовский И. К., Волков Ю. И. Получение синтетических чугунов из стружки.—Литейное производство, 1966, 8, 8—12.
34. Клочнев Н. И. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом. Mashgiz, М., 1963.
35. Коган Л. Б., Жельнис М. В. и др. Факторы стойкости футеровки индукционных печей.—Литейное производство, 1968, 10, 27—29.
36. Коган Л. Б., Гайдуков А. А. Поведение отдельных элементов при плавке синтетического чугуна из отходов динамной стали.—Литейное производство, 1968, 9, 4—5.
37. Коган Л. Б. и др. Влияние модифицирования и технологии плавки на свойства синтетического чугуна. Литейное производство, 1969, 1, 26—28.
38. Куликов И. С. Десульфурация чугуна. Металлургиздат, М., 1962.

39. Костяков В. Н.—Окисление железа продуктами сгорания природного газа.—В кн.: Теория и практика работы современных промышленных печей. Госэнергоиздат, Л., 1963.
40. Лакомский В. И., Явойский В. И. Газы в чугунах. Гостехиздат, К., 1959.
41. Лузан П. П., Шумихин В. С., Жельнис М. В. Выплавка синтетического чугуна в индукционных электропечах.—В кн.: Технология и организация производства. 2. УкрНИИТИ, К., 1967.
42. Малисов Л. З. Чугунолитейный цех с индукционными печами промышленной частоты.—Литейное производство, 1966, 7, 18—19.
43. Малисов Л. З., Коган Л. Б., Жельнис М. В. Применение индукционных печей в чугунолитейных цехах.—Литейное производство, 1967, 7, 18—19.
44. Малисов Л. З., Коган Л. Б., Жельнис М. В. Применение индукционных печей в чугунолитейных цехах.—Литейное производство, 1967, 5, 1—4.
45. Мамыкин П. С. Огнеупорные изделия. Metallurgizdat, М., 1955.
46. Маринчек Б., Файхтингер Т. Газы в чугуне.—В кн.: 25-й Международный конгресс литейщиков. ГНТИМЛ, М., 1961 (перевод с английского).
47. Методы химического анализа огнеупорного сырья и изделий. Metallurgizdat, М., 1954.
48. Мильман Б. С., Бложко Н. К., Горшенков А. Н. Получение чугуна с шаровидным графитом непосредственно в плавильной печи.—В кн.: Тезисы докладов VIII конференции по теории и практике производства высокопрочного чугуна. «Техника», К., 1969.
49. Мысовский В. С., Коваль А. П.—Литейное производство, 1967, 2.
50. Самарин А. М. Физико-химические основы раскисления стали. Изд-во АН СССР, М., 1956.
51. Самарин А. М. О структуре и свойствах металлических расплавов.—Физика и химия обработки материалов, 1967, 3, 93—115.
52. Самарин А. М., Шварцман Л. А. Вязкость жидких железо-углеродистых сплавов.—Изв. АН СССР, ОТН, 1949, 6, 891—899.
53. Самарин А. М., Шварцман Л. А. Влияние кремния на термодинамическое поведение углерода в твердом и жидком железе.—Изв. АН СССР, ОТН, 1950, 11, 1696—1700.
54. Самарин А. М., Измайлов В. А. О микрогетерогенности чугуна.—ДАН СССР, 1969, 6, 185, 1276—1279.
55. Соколов В. М. О механизме процесса жидкого модифицирования чугунов.—Литейное производство, 1964, 4, 22—24.
56. Стрелов К. К. Технический контроль производства огнеупоров. Metallurgizdat, М., 1952.
57. Стрельцов Ф. Н., Перевалов Н. Н., Травин О. В.—В кн.: Теория металлургических процессов. «Металлургия», М., 1967, 45—59.
58. Тиллер В. А. Зонная плавка. Metallurgizdat, М., 1968.
59. Трофимов М. Т. Футеровка индукционных печей. Металлургия, М., 1968.

60. Уикс К. И., Блок Ф. Е. Термодинамические свойства 65 элементов. Металлургия, М., 1965.

61. Филиппов С. И., Крашенинников М. Г. Закономерности механизма зарождения пузырей окиси углерода в металлической ванне.— В кн.: Физико-химические основы металлургических процессов. Металлургиздат, М., 1964, 149—160.

62. Шевцов М. А., Ежова Л. М. Техничко-экономические предпосылки плавки чугуна в индукционных электропечах.— Литейное производство, 1968, 9, 1—4.

63. Шумихин В. С. и др.— Авт. свид. № 263616 (Бюллетень изобретений, 1970, 8).

64. Шурыгин П. М., Крюк В. И. О кинетике растворения углерода в расплавах на основе железа.— Изв. вузов, СССР. Черная металлургия, 1963, 2, 14—17.

65. Щербakov Н. Л. Индукционные печи в литейном производстве.— Литейное производство, 1966, 10, 43—48.

66. Эллиот Д. Ф. Равновесие углерода—кислорода в жидком железе.— В кн.: Физическая химия процессов сталеварения. Металлургиздат, М., 1963, 71—77.

67. Явойский В. И. Теория процессов производства стали. Металлургиздат, М., 1963.

68. Aldera A.—Fonderie Ital, 1964, 13, 2, 55—65.

69. Brokmeier K. H.—Elektrowärme, 1965, v. 18, 1, 13—20.

70. Brokmeier K. H.—Gisserei, 1967, 54, 26, 695—698.

71. Calamari E.—Fonderia Ital, 1960, 9, 4, 183—190.

72. Caspers K. H.—Gisserei, 1963, 50, 2, 56—60.

73. Caspers K. H.—Gisserei, 1969, 56, 9, 245—251.

74. Damaskos N. I., Hughes W. F.—Proceedings the Inst. of Electrical, 1963, v. 110, 6, 1089—1095.

75. Demharter I., Caspers K. H.—Gisserei, 1961, 48, 16, 461—464.

76. Feldhus H.-G., Schonborn I.—Gisserei—Praxis, 1969, 8, 127—132.

77. Gisserei—Praxis, 1966, 14, 270—271.

78. Gisserei, 1961, 48, 1. BBC.

79. Hartman D.—Gisserei, 1969, 56, 9, 234—241.

80. Hartman D.—Gisserei, 1969, 56, 9, 245—251.

81. Heine R. W., Loper C. R.—Modern Castings, 1966, 50, 3, 113—115.

82. Hiller W.—Foundry, 1962, 90, 12, 54—57.

83. Hiller W.—Gisserei, 1964, 51, 5, 15—19.

84. Hocke H.—Gisserei, 1963, 22, 677—689.

85. Holt I.—Foundry Trade Journal, 1969, 126, 2740, 909—911.

86. Hosfield R. L.—Modern Castings, 1969, 55, 3, 55—58.

87. Marincek B.—Gisserei, 1962, 49, 15, 414—417.

88. Mayer H.—Gisserei, 1967, 54, 9, 236—244.

89. Müller H.—Gisserei, 1963, 50, 15, 445—449.

90. Neumann F., Patterson W., Albrecht D.—Gisserei, Techn.—Wiss. Beihefte, 1964, 3, 155—156.

91. Oelsen W., Roesch K., Orths K.—Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1955, 260, 11, 1—13.

92. Oelsen W.—Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1967, 36, 6, 415—421.

93. Pavlik I.—Slevarenstvi, 1967, 9, 349—353.

94. Render I. E. Foundry, 1965, 93, 4, 5.

95. Reimers H.—Gisserei, 1965, 52, 4, 95—101.

96. Rubensdorfer F., Kühn H.—Gisserei, 1963, 50, 2, 41—51.

97. Shaw J. M.—Foundry, 1969, 97, 2, 50—51.

98. Tagliaferri A., Oliva P. L.—Fonderie belge, 1960, 30, 2, 44—51.

99. Turner H., Burgleigh R.—British Foundrymen's, 1963, 56, 12, 510—520.

100. Underwood W. A.—Modern Castings, 1969, 55, 4, 104—107.

101. Wagner K.—Gisserei, 1964, 51, 8, 221—227.

102. Wicker H. Gisserei, 1966, 2, 27—30.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Плавильные установки	6
1. Индукционные печи	6
2. Работа плавильной установки	14
3. Подготовка шихтовых материалов	20
4. Футеровка индукционных печей промышленной частоты	26
5. Организация контроля плавки	45
Глава II. Металлургические процессы плавки синтетического чугуна	54
1. Науглероживание жидкого сплава в индукционных электропечах промышленной частоты	55
2. Угар (пригар) элементов при плавке чугуна в индукционных печах	80
3. Содержание газов и неметаллических включений в синтетических сплавах	95
Глава III. Прочностные свойства синтетических чугунов	107
1. Влияние исходных шихтовых материалов на свойства синтетического чугуна	107
2. Термовременная обработка и модифицирование чугуна	127
3. Получение чугунов различных марок при индукционной плавке	143
Литература	153

ШУМИХИН ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ
ЛУЗАН ПЕТР ПЕТРОВИЧ
ЖЕЛЬНИС МЕЧИСЛОВАС ВИНЦО

СИНТЕТИЧЕСКИЙ ЧУГУН

Печатается по постановлению ученого совета
Института проблем литья АН УССР

Редактор *И. Г. Бобрышева*. Художественный редактор
И. В. Козий. Оформление художника *Г. М. Балюна*.
Технический редактор *И. Е. Немченко*.
Корректор *Л. Н. Рогета*.

Сдано в набор 29/I-1971 г. Подписано к печати 10/VIII-
1971 г. БФ 04060. Зак. № 62. Изд. № 154. Тираж 1600.
Бумага № 1, 84×108¹/₃₂. Условно-печ. листов 8,4. Учетно-изд.
листов 8,42. Цена 91 коп.

Издательство «Наукова думка», Киев, Репина, 3.
Киевская книжная типография № 5 Комитета по печати
при Совете Министров УССР, Киев, Репина, 4.