

А. М. САМАРИН

ВАКУУМНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ
Москва 1958

АННОТАЦИЯ

В брошюре кратко изложены методы вакуумной плавки металлов и сплавов, а также способы обработки жидкой стали в вакууме. На основе ряда исследований и практического опыта металлургических заводов СССР приведены сравнительные данные, характеризующие качество металла, полученного методом вакуумирования, и металла, выплавленного по обычной технологии. Изложены проблемы и перспективы дальнейшего развития вакуумной металлургии.

Брошюра рассчитана на инженеров-металлургов предприятий и научно-исследовательских институтов.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение.....	3
Индукционные вакуумные печи.....	5
Дуговые вакуумные печи.....	13
Обработка жидкой стали в вакууме.....	18
Герметизация вакуумных печей.....	26
Вакуумные печи сопротивления.....	29
Ближайшие перспективы.....	33

ВВЕДЕНИЕ

Успешное развитие многих отраслей современной техники немыслимо без применения чистейших металлов и специальных сплавов, полученных на их основе. При сооружении устройств для генерации электрической энергии на базе использования тепла, возникающего в результате ядерных реакций, при изготовлении электронной аппаратуры, строительстве сверхскоростного транспорта широкое применение находят такие металлы, как цирконий, гафний, титан, германий, кремний, ниобий, тантал, ванадий, молибден, хром и многие другие.

Необходимость получения этих металлов в чистом виде с весьма низким содержанием в них различных примесей и обусловила быстрое развитие новой отрасли современного металлургического производства — вакуумной металлургии.

Новые, более высокие требования предъявляются теперь и к обычной продукции сталеплавильного производства. Крупные слитки, предназначенные для изготовления валов мощных турбин, электрических генераторов в несколько сот тысяч киловатт, необходимо отливать из стали с весьма низким содержанием водорода. В конструкционных легированных сталях, рельсовой стали высокое содержание водорода также недопустимо.

Жаропрочные сплавы, используемые для изготовления деталей реактивных двигателей самолетов, обладают достаточной пластичностью только при минимальном содержании в сплавах неметаллических включений. Надежная и длительная работа подшипников в приборах с весьма малым моментом трогания или с очень большим числом оборотов (более ста тысяч в минуту) может быть обеспечена лишь в случае изготовления этих подшипников из стали, свободной от крупных частиц неметаллических включений. Листы из нержавеющей хромоникелевой стали толщиной в несколько десятков микрон могут быть получены при условии, если содержание углерода в этой стали не превы-

шает предела его растворимости в металле при комнатной температуре, т. е. в том случае, когда сталь не склонна к интеркристаллитной коррозии без дополнительного легирования титаном, ниобием или танталом.

Стали и сплавы с весьма низким содержанием газов (кислорода, водорода, азота и др.) и неметаллических включений могут быть получены лишь в результате применения вакуума в процессе выплавки, разливки и дальнейшей их обработки.

Применение вакуума — это новый и надежный путь дальнейшего совершенствования современных процессов производства стали и сплавов, коренного улучшения качества продукции и повышения выхода годного в металлургии.

ИНДУКЦИОННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ПЕЧИ

Индукционные вакуумные печи уже давно нашли широкое применение в лабораторной практике, однако как промышленные агрегаты, предназначенные для выплавки в них больших количеств металла, эти печи стали использоваться лишь недавно. Емкость промышленных индукционных вакуумных печей в настоящее время доведена до 1,5 т.

Индукционные вакуумные печи являются наиболее подходящими для выплавки в них сталей и сплавов с низким содержанием углерода. При этом низкое содержание кислорода в стали может быть достигнуто путем использования в качестве раскислителя лишь одного углерода. Таким образом, в индукционных вакуумных печах возможно получать стали не только с низким содержанием растворенного кислорода, но и весьма чистые по неметаллическим включениям — продуктам реакций раскисления.

Так, например, основные свойства трансформаторной стали удалось значительно улучшить в результате выплавки ее в индукционной вакуумной печи под давлением порядка 1—10 мм рт. ст. [1].

В табл. 1 приведено сравнение свойств трансформаторной стали, выплавленной в обычной и вакуумной лабораторных индукционных печах.

Таблица 1

Влияние метода выплавки на свойства трансформаторной стали

Метод выплавки	Ваттные потери <i>вт/кг</i>		Магнитная проницаемость <i>гс/эрст</i>		Коэрцитивная сила <i>эрст</i>
	P_{10}	P_{18}	начальная	максимальная	
Обычный	0,90—1,18	2,05—2,70	500—640	5 400—9 000	0,352—0,535
В вакууме	0,67—0,85	1,67—1,78	1 100—4 000	10 400—13 900	0,220—0,283

На рис. 1 показаны статические петли гистерезиса трансформаторной стали двух плавок — одной, выплавленной в обычной

индукционной печи (плавка № 3) и второй (плавка № 9) — в вакуумной. Меньшая площадь петли для стали, выплавленной в вакуумной печи, конечно, характеризует и более низкие потери энергии на перемagnetивание.

Улучшение свойств трансформаторной стали, выплавленной в вакууме, было достигнуто за счет более низкого содержания кислорода и, в соответствии с этим, неметаллических включений, чем в стали, выплавленной в обычной печи. Действительно, содержание кислорода в стали, выплавленной в обычной печи, было в пределах от 0,0145 до 0,0196 процента и неметаллических включений — от 0,034 до 0,050 процента; в стали, выплавленной в вакуумной печи, содержание кислорода было в пределах от

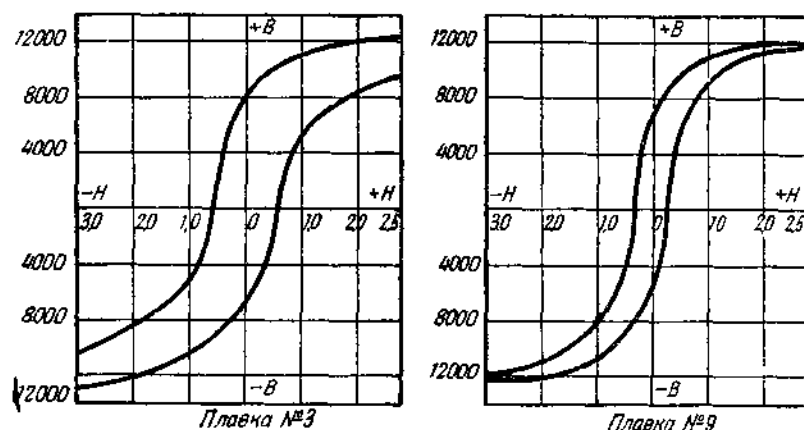


Рис. 1. Статические петли гистерезиса трансформаторной стали

0,0019 до 0,0026 и неметаллических включений — от 0,004 до 0,007 процента.

Кроме того, частицы включений, выделенные при анодном растворении стали, выплавленной в вакууме, оказались немагнитными.

Более высокая степень чистоты металла по неметаллическим включениям обеспечила возможность получения крупного зерна в стали, выплавленной в вакууме.

Другой пример: трансформаторная сталь была выплавлена в промышленной вакуумной индукционной печи емкостью 150 кг; остаточное давление в печи при выдержке в ней жидкого металла составляло 1—2 мм рт. ст. Содержание кремния в стали от 3,45 до 4,12 процента.

Несмотря на повышенное содержание кремния, сталь была прокатана на стане холодной прокатки в ленту толщиной 0,32; 0,20 и 0,08 мм.

Коэрцитивная сила трансформаторной стали, выплавленной

в 150-кг печи, в зависимости от толщины листов была следующей:

Толщина листов, мм . . .	0,32	0,20	0,08
Коэрцитивная сила, эрст	0,204—0,314	0,234—0,376	0,256—0,315

В результате наблюдений установлено, что при выплавке трансформаторной стали в вакууме жидкий металл очищается от кислорода и серы при отсутствии шлака на поверхности металла. Раскислительная способность углерода при снижении давления в плавильном пространстве до 1 мм рт. ст. повышается почти в сто раз [2].

Использование вакуума при выплавке трансформаторной стали обеспечивает возможность повышения содержания в ней кремния и снижения ваттных потерь на 20—25 %.

Подобное снижение ваттных потерь имеет огромное народнохозяйственное значение в период быстрого роста новых установок для генерации электрической энергии. Если для сооружения устройств, связанных с передачей и распределением электрической энергии, использовать трансформаторную сталь, ваттные потери которой на 20 процентов ниже, чем стали, ныне используемой, то, принимая современный уровень расхода этой стали на силовые трансформаторы, ежегодная экономия электрической энергии, только при эксплуатации вновь вводимых каждый год трансформаторов, составит более 500 миллионов киловатт-часов. Использование трансформаторной стали улучшенного качества позволит, помимо экономии электрической энергии, снизить расход этой стали и меди на сооружение трансформаторов.

Положительные результаты в повышении качества хромоникелевой нержавеющей стали получены при обезуглероживании этой стали в индукционной вакуумной печи [3].

Как известно, в последнее время, за счет применения кислорода, значительно улучшены показатели производства нержавеющей стали методом переплава отходов этой стали. Несмотря на эти достижения, нельзя ныне используемый метод признать оптимальным, вследствие того, что при его применении нельзя получить нержавеющей сталь с весьма низким содержанием углерода. Кроме того, при этом методе выплавки потери хрома остаются еще очень высокими (иногда достигают 20 процентов от содержания хрома в отходах нержавеющей стали); повышается также расход огнеупорных материалов из-за быстрого износа футеровки подины и откосов дуговых печей.

Поэтому по-прежнему необходимо продолжать поиски более рационального метода использования отходов нержавеющей сталей.

Отходы стали IX18H9T или хромоникелевая сталь без титана, специально выплавленная для целей исследования, содержащая до 0,12% углерода, были переплавлены в вакуумной индукционной печи. За счет присадки небольшого количества железной руды, в течение 40—60-минутной выдержки при остаточном давлении

лении 5—20 мм рт. ст., содержание углерода в стали было снижено до 0,01—0,02 процента; значительно снизилось при этом и содержание титана (на 57—95 процентов). Потери же хрома при переплаве отходов не превысили 4 процентов.

Как и следовало ожидать, аустенитная нержавеющая сталь, содержащая не выше 0,02% углерода, при отсутствии в ее составе стабилизирующих элементов, оказалась устойчивой против интеркристаллитной коррозии. Влияние углерода на устойчи-

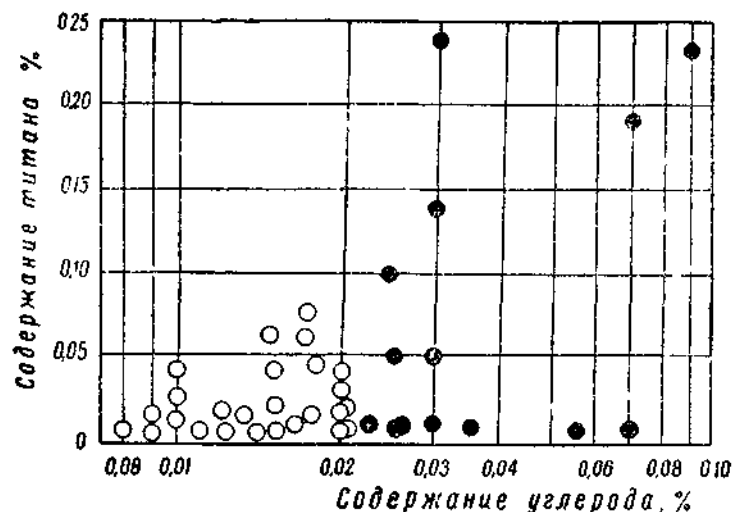


Рис. 2. Влияние углерода на устойчивость нержавеющей стали против интеркристаллитной коррозии

вость нержавеющей стали против интеркристаллитной коррозии показано на рис. 2 (светлыми кружками отмечена сталь, устойчивая против интеркристаллитной коррозии, темными кружками — сталь, обнаружившая склонность к интеркристаллитной коррозии).

Неблагоприятное влияние титана на устойчивость нержавеющей стали против общей коррозии общеизвестно [4]. На рис. 3 представлены результаты определения устойчивости против общей коррозии в 60%-ной кипящей азотной кислоте двух групп хромоникелевой стали — содержащей 0,01—0,03% углерода без титана и с 0,07—0,09% углерода и 0,24—0,32% титана. Сталь была испытана в закаленном и отпущенном состояниях.

Как следует из данных, представленных на рис. 3, стали обеих групп после закалки обладают достаточно высокой и почти одинаковой устойчивостью против коррозии. В результате отпуска устойчивость против коррозии стали, не содержащей титана и с низким содержанием углерода, практически не меняется. Наоборот, резко (в десятки раз) снижается устойчивость

против общей коррозии легированной титаном стали с повышенным содержанием углерода.

Таким образом, за счет снижения в аустенитной нержавеющей стали содержания углерода до 0,01—0,02 процента и отказа

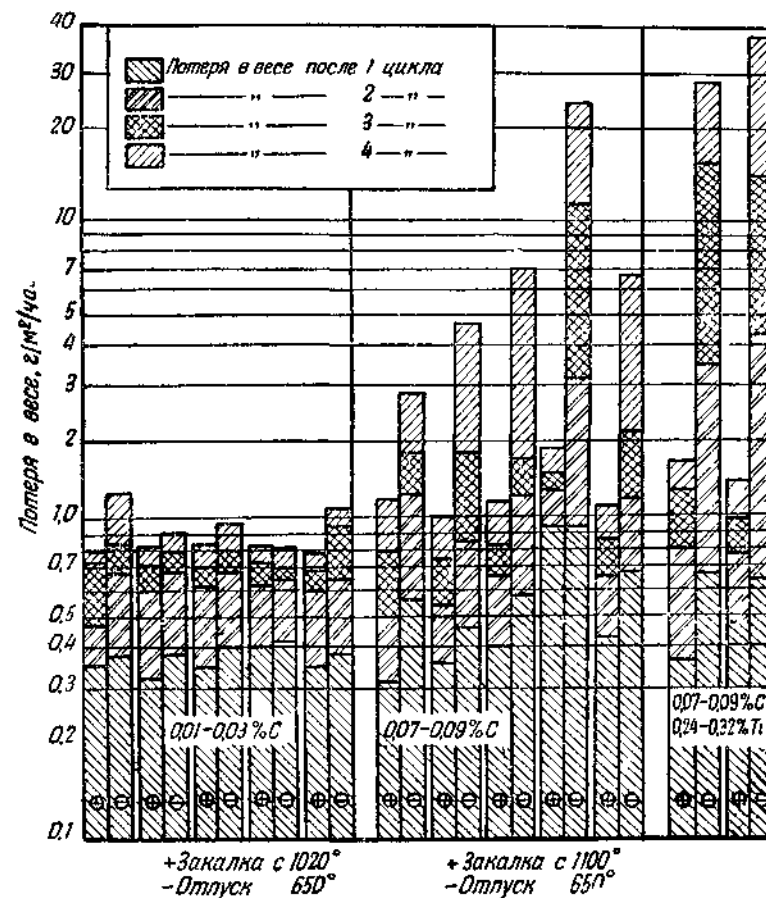


Рис. 3. Влияние углерода и титана на устойчивость нержавеющей стали против общей коррозии

от введения в сталь стабилизирующих элементов — титана, ниобия или тантала — обеспечено получение стали, устойчивой против интеркристаллитной коррозии и с более высокой сопротивляемостью агрессивным средам.

Технология выплавки и разлива нержавеющей стали, содержащих стабилизирующих элементов, менее сложна, при этом снижается также и стоимость этих сталей.

Следует также указать, что карбиды титана, ниобия и тантала, образующиеся в нержавеющей стали, делают эту сталь не

пригодной для холодной прокатки в листы или ленту толщиной в несколько микрон и, тем самым, ограничивают возможность ее применения в некоторых сооружениях современной техники.

Выплавка в вакууме оказывает благотворное влияние и на свойства жаропрочных сплавов.

В качестве примера приведем сравнение свойств жаропрочного сплава на никелевой основе в литом состоянии в зависимости от метода выплавки. На рис. 4 представлены результаты этого сравнения. Продолжительность службы этого сплава при соответствующих температуре и напряжении установлена в 20 час.

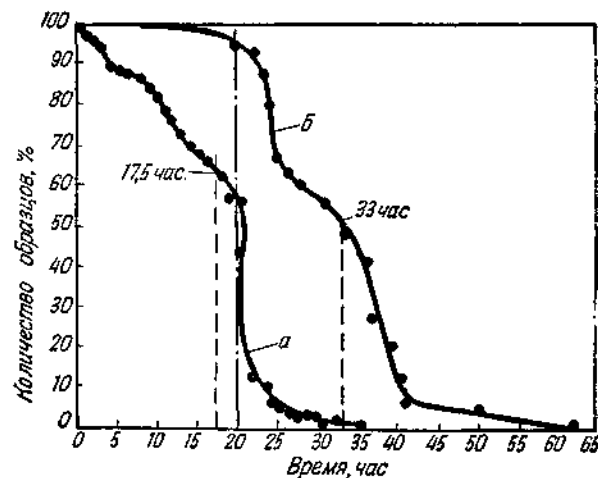


Рис. 4. Влияние метода выплавки на свойства жаропрочного сплава

(см. на рис. 4 среднюю пунктирную линию). Если сплав выплавлен в индукционной печи под аргоном (кривая *а*), то среднее значение продолжительности службы для испытанных образцов составляет 17,5 часа, а выход сплава, отвечающего требованиям технических условий, не на много выше 50 процентов. В случае выплавки в вакуумной индукционной печи (кривая *б*) среднее значение продолжительности службы этого сплава повысилось почти в два раза — до 33 часов, а выход сплава, отвечающего требованиям технических условий, составил более 95 процентов.

Сплав, выплавленный в вакууме, характеризуется достаточно низким содержанием в нем кислорода — 0,0004—0,0011 процента.

* * *

В связи с расширением применения в промышленной практике крупных индукционных вакуумных печей должны быть решены отдельные вопросы с целью устранения некоторых препятствий, мешающих успешному использованию этих печей.

Основное внимание должно быть привлечено к разработке рациональных конструкций непрерывно действующих печей, т. е. работающих без нарушения вакуума в плавильном пространстве в течение длительного времени. При этом условии устраняется соприкосновение огнеупорных материалов с атмосферой и адсорбция газов на поверхности устройств, расположенных в плавильном пространстве. Благодаря этому сокращается продолжительность плавки и обеспечивается получение стали и сплавов с более низким содержанием газов.

Техническая возможность постройки и эксплуатации подобной печи в заводских условиях сейчас установлена.

На рис. 5 представлена схема печи, в которой плавильное пространство может быть отделено от бункера с шихтовыми ма-

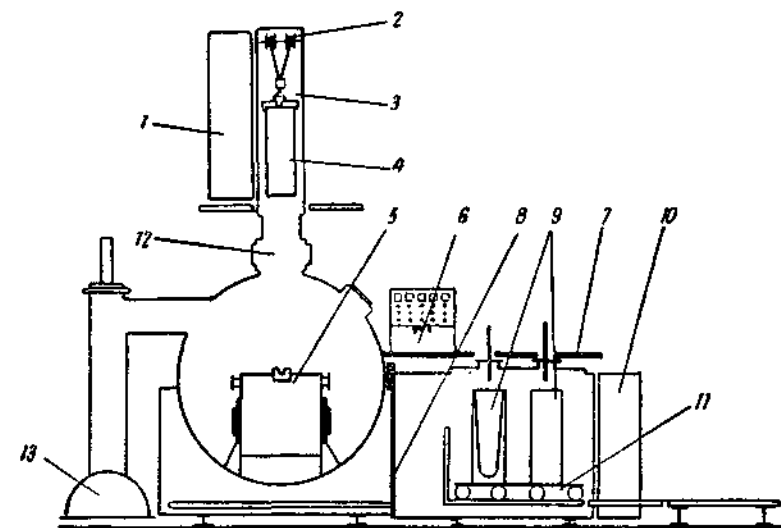


Рис. 5. Схема устройства индукционной вакуумной печи:

1 — дверь; 2 — подъемник; 3 — загрузочная камера; 4 — загрузочная корзина; 5 — индукционная печь; 6 — пульт управления; 7 — электроды; 8 — внутренняя дверь; 9 — изложницы; 10 — дверь; 11 — тележка; 12 — вакуумная задвижка; 13 — вакуумные насосы

териалами и от камеры для изложниц. Следовательно, загрузка шихтовых материалов в бункер и выдача слитков, застывших в камере, могут быть осуществлены без нарушения вакуума в плавильном пространстве. Оборудование насосной станции, обслуживающей печь и связь между отдельными насосами, позволяет раздельно вести откачку из плавильного пространства, шихтового бункера или камеры для изложниц; мощность всей станции, по мере надобности, может быть использована для эвакуации одной какой-либо из перечисленных частей печи.

Изыскание огнеупорных материалов и методов изготовления футеровки индукционных вакуумных печей является одной из

важнейших задач. Обезуглероживание жидкого металла в этих печах можно осуществить достаточно полно. Однако при выплавке многих сталей и сплавов в тиглях из окиси магния по мере снижения углерода жидкий металл обогащается кислородом.

На рис. 6 показано, как повышается в нержавеющей стали содержание кислорода по мере удлинения выдержки этой стали в жидком состоянии в вакуумной индукционной печи. В результате длительной выдержки, особенно при повышенных температурах, содержание кислорода приближается к пределу его растворимости [5, 6].

Можно предполагать, что обезуглероживание в этом случае идет за счет взаимодействия углерода с окисью магния, причем

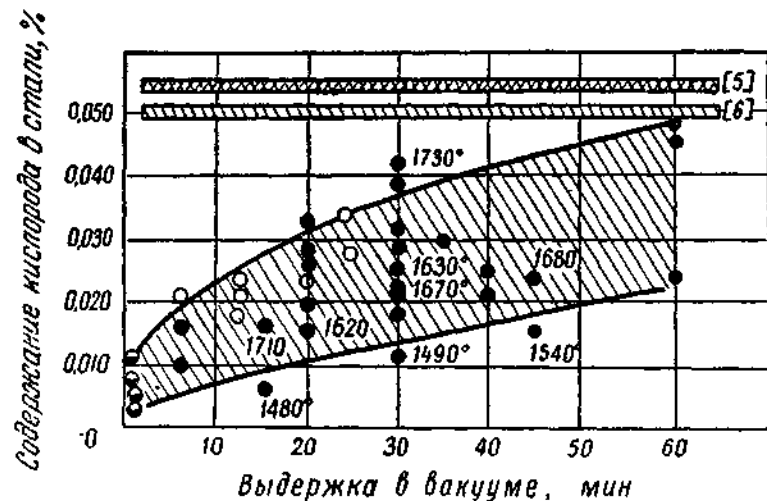


Рис. 6. Влияние выдержки в вакууме на повышение содержания кислорода в нержавеющей стали

магний, обладающий высокой упругостью пара, будучи нерастворим в жидком металле, улетучивается и образующаяся окись углерода испаряется, а кислород, растворенный в жидком металле, не принимает участия в процессе обезуглероживания.

В случае применения тиглей, изготовленных из глинозема или окиси циркония, можно наблюдать восстановление алюминия или циркония за счет взаимодействия футеровки с жидким металлом. Алюминий и цирконий, растворяясь в металле, будут его раскислять, причем не все образующиеся при этом окислы могут удаляться из металла. Таким образом, возможности получения стали и сплавов, чистых от неметаллических включений, снижаются.

Применение тиглей с глазурированной поверхностью или авто-тиглей, очевидно, может устранить взаимодействие между жидким металлом и футеровкой индукционных печей.

ДУГОВЫЕ ВАКУУМНЫЕ ПЕЧИ

В дуговых вакуумных печах как с постоянным, так и с расходуемым электродом обеспечено получение стали и сплавов с более низким содержанием кислорода, азота и водорода, чем при выплавке в индукционных вакуумных печах. Эта повышенная чистота стали и сплавов объясняется тем, что в дуговых вакуумных печах нет контакта жидкого металла с огнеупорными материалами футеровки. В этих печах жидкий металл в течение очень короткого промежутка времени находится в соприкосновении лишь со стенками водоохлаждаемого медного кокиля, в котором он и затвердевает. Кроме того, весьма высокая температура в зоне электрической дуги благоприятствует диссоциации нитридов и восстановлению окислов.

В промышленной практике более широкое применение для получения слитков имеют дуговые вакуумные печи с расходуемым электродом. Естественно, что эти печи предназначены для переплава в вакууме сталей и сплавов, выплавленных ранее в других сталеплавильных агрегатах, поэтому дополнительное легирование в них практически не осуществляется. Это, конечно, является известным недостатком дуговых вакуумных печей с расходуемым электродом.

На рис. 7 показано устройство лабораторной дуговой вакуумной печи, в которой возможно получение слитков диаметром 100—150 мм. В качестве расходуемого электрода использованы штанги длиной 1200 мм и диаметром 60—100 мм. Вес получаемых стальных слитков составляет 25—75 кг.

Печь питается постоянным током с отрицательной полярностью на электроде. Источником постоянного тока являются два генератора, подключенные параллельно; мощность каждого генератора 60 кВт, напряжение 60 в. При параллельном включении генераторов возможно подведение тока силой 2000 а.

Перемещение электрода автоматизировано — во время плавки регулятор поддерживает заданную длину дуги.

Расход электрической энергии в этой небольшой печи на расплавление стальных электродов составляет 800 кВт·ч/т.

Понижение давления в рабочем пространстве печи до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. достигается за счет работы двух бустерных масляных насосов БН-3 (производительность каждого 500 л/сек) и двух форвакуумных насосов ВН-1 (производительность каждого 1100 л/мин).

Эта печь была использована для переплава шарикоподшипниковой стали, выплавленной в дуговой электрической печи, с целью снижения содержания в стали неметаллических включений.

В табл. 2 приведены данные об изменении содержания в стали кислорода, углерода и серы в результате переплава в дуговой вакуумной печи.

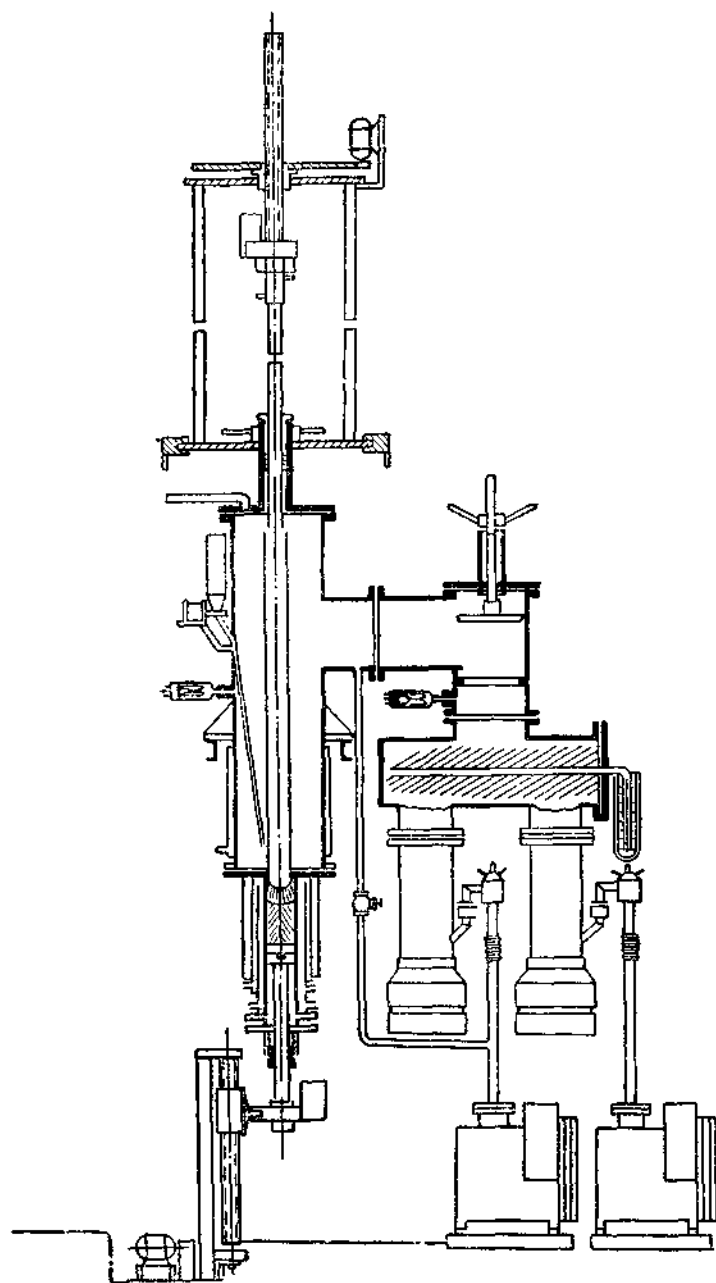


Рис. 7. Схема устройства дуговой вакуумной печи

Таблица 2
Изменение состава шарикоподшипниковой стали при переплаве
в вакуумной дуговой печи

№ плавки	Состояние стали	Кислород %	Углерод %	Сера %	Давление в плавильном пространстве мм рт. ст.
11	До переплава	0,0054	0,98	0,009	$7 \cdot 10^{-4}$
	После переплава	0,0020	0,92	0,006	
12	До переплава	0,0028	1,03	0,006	$7 \cdot 10^{-4}$
	После переплава	0,0014	1,05	0,006	
13	До переплава	0,0031	0,95	0,006	$6 \cdot 10^{-4}$
	После переплава	0,0015	0,97	0,006	
14	До переплава	0,0040	1,07	0,006	$5 \cdot 10^{-4}$
	После переплава	0,0020	1,09	0,006	
15	До переплава	0,0052	0,99	0,005	$8 \cdot 10^{-4}$
	После переплава	0,0020	0,96	0,005	

Как видно из приведенных данных, переплав в дуговой вакуумной печи не оказывает влияния на содержание углерода и серы в стали, в то время, как содержание кислорода в результате переплава снижается более чем в два раза.

Степень загрязнения шарикоподшипниковой стали неметаллическими включениями не находится в прямой зависимости от содержания в ней кислорода. Эта степень определяется размером и характером распределения частиц включений в стали.

Таблица 3
Оценка качества шарикоподшипниковой стали

Сталь	Балл		
	оксиды	сульфиды	глобулярные включения
Выплавлена в дуговой печи	1,80	1,7	2,10
Переплавлена в дуговой вакуумной печи (плавка № 6)	0,25	0,2	0,83
Переплавлена в дуговой вакуумной печи (плавка № 10)	0,55	0,2	1,00

В табл. 3 приведена характеристика степени чистоты шарикоподшипниковой стали, выплавленной в дуговой электрической пе-

чи, отобранной для изготовления подшипников ответственного назначения. В этой же таблице приведены результаты оценки после переплава стали в дуговой вакуумной печи.

Оценка в баллах является средней для десяти образцов стали заводского производства и из каждого слитка, полученного в дуговой вакуумной печи.

Переплав в дуговой вакуумной печи обеспечивает получение шарикоподшипниковой стали с такой степенью чистоты, которая недостижима ни при каких условиях при выплавке этой стали в обычных дуговых электрических печах.

Стендовые испытания подшипников, изготовленных из стали, полученной в дуговой вакуумной печи, показали, что заданная продолжительность службы подшипников обеспечена как при 70 000, так и при 100 000 об/мин.

В результате переплава шарикоподшипниковой стали получают плотные слитки (рис. 8).

Жаропрочные сплавы характеризуются низкой пластичностью, вследствие чего при выплавке их в обычных дуговых или индукционных печах получают сравнительно низкий выход годного металла. С целью повышения качества жаропрочного сплава на никелевой основе был применен метод переплава в дуговой вакуумной печи. Изменение содержания некоторых элементов в сплаве в результате переплава представлено в табл. 4.

В результате переплава в дуговой вакуумной печи, как следует из данных, приведенных в табл. 4, содержание кислорода в сплаве значительно снижается, заметно снижается и содержание азота.

Переплав в дуговой вакуумной печи обеспечил улучшение свойств жаропрочного сплава — значительно повысилась пластичность (удлинение возросло в 1,5—2,0 раза), длительная прочность при рабочих температурах улучшена на 25—30 процентов.

Дуговые вакуумные печи с расходуемым электродом применяются для получения только слитков. Возможность получения в них жидкого металла для отливки фасонных изделий почти полностью исключена. При переплаве в этих печах исключена также возможность дополнительного легирования — состав полученного металла определяется составом переплавляемых электродов.

* * *

В связи с расширением применения дуговых вакуумных печей с расходуемым электродом в промышленности, подлежат решению три основные проблемы.

Первая проблема. Непрерывное вытягивание слитка из медного кокиля во время плавления электрода. В случае положительного решения этой задачи и применения устройств для наращивания электрода по мере его расплавления, дуговая вакуумная печь будет превращена в агрегат, в котором процессы плавления и разлива являются непрерывными.

Таблица 4
Влияние переплава в дуговой вакуумной печи на изменение состава жаропрочного сплава

№ плавки	Состояние сплава	Кислород, %	Азот, %	Углерод, %	Сера, %	Давление в печи мм рт. ст.
7	До переплава	0,0045	0,014	0,05	0,006	$5 \cdot 10^{-4}$
	После переплава	0,0013	0,011	0,04	0,004	
8	До переплава	0,0050	0,014	0,05	0,006	$6 \cdot 10^{-4}$
	После переплава	0,0026	0,010	0,05	0,004	
9	До переплава	0,0050	0,020	0,05	0,004	$4 \cdot 10^{-4}$
	После переплава	0,0020	0,014	0,05	0,004	

Рис. 8 Разрез слитка шарикоподшипниковой стали, полученного в дуговой вакуумной печи

Вторая проблема. Замена постоянного тока переменным; за счет этого будут значительно снижены капитальные затраты на установку дуговых вакуумных печей.

Третья проблема. Создание условий для безопасной эксплуатации дуговых вакуумных печей. Эта задача будет решена положительно, если удастся заменить водяное охлаждение медного кокиля какой-либо другой системой охлаждения.

ОБРАБОТКА ЖИДКОЙ СТАЛИ В ВАКУУМЕ

Несомненно, в ближайшем будущем индукционные и дуговые вакуумные печи получат широкое применение в сталеплавильной промышленности. Однако нельзя рассчитывать, что в этих печах в ближайшее время ежегодно можно будет выплавлять миллионы тонн стали и сплавов, вследствие сложности конструкции самих вакуумных печей и необходимости использования при этом электрической энергии.

В 1940 г. был предложен новый метод использования вакуума для улучшения качества стали [7]. Сущность метода заключается в следующем: жидкая сталь, полученная в любом сталеплавильном агрегате, подвергается обработке в вакууме, для чего ковш с жидкой сталью помещается в камеру, из которой откачивается воздух, а затем и газы, выделяющиеся из стали. В другом случае пониженное давление создается при заполнении сталью изложниц.

В промышленной практике предложенный метод был впервые опробован на Енакиевском металлургическом заводе. Бессемеровская рельсовая и кипящая сталь подвергалась обработке в вакууме в 16-т ковше и в изложницах при отливке 4-т слитков. Ковш с жидкой сталью выдерживали в вакуумной камере 12—14 мин., снижая давление в камере до 70—100 мм рт. ст.

Изменение содержания в стали кислорода и азота в результате обработки в вакууме графически представлено на рис. 9. На этом же рисунке помещены данные о содержании этих газов в стали, не подвергавшейся обработке в вакууме. Как следует из данных, представленных на рис. 9, непродолжительная выдержка конвертерной стали под пониженным давлением обеспечила снижение содержания кислорода в стали в 4—10 раз, причем содержание кислорода в стали, обработанной в вакууме, в 2,5—5 раз ниже, чем в стали, полученной обычным методом. Содержание азота за счет обработки в вакууме было снижено на 30—50 процентов.

На заводе им. Дзержинского в эксплуатации находится камера для обработки в вакууме жидкой бессемеровской стали в ковше емкостью 22,5 т. Схема устройства этой камеры приведена на рис. 10.

При вакуумной обработке рельсовой бессемеровской стали для окончательного раскисления в сталь после ее обработки в

вакууме вводили алюминий в количестве от 150 до 900 г на тонну стали. Сталь некоторых плавок была легирована добавкой 0,10—0,15% ванадия.

В результате 10—15-минутной обработки в вакууме содержание в рельсовой стали водорода снижается в 2—2,5 раза (в среднем до 2 см³/100 г), кислорода — в 4—8 раз, на 10—20 процентов снижается содержание азота.

Очищение рельсовой стали от газов, в результате обработки в вакууме, обусловило повышение пластичности стали — удли-

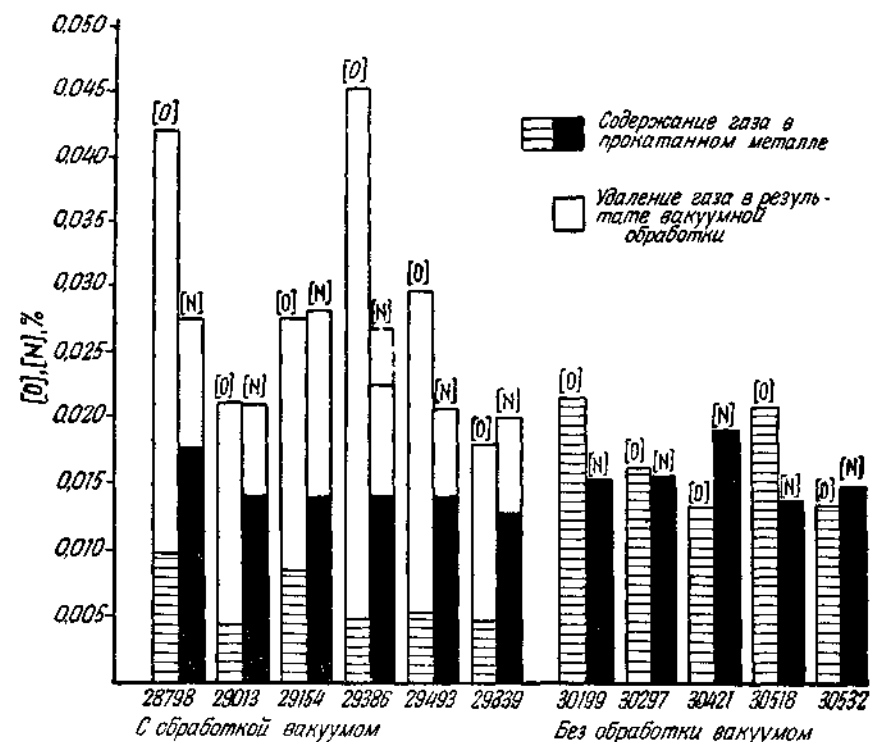


Рис. 9. Изменение содержания кислорода и азота в бессемеровской стали в результате обработки в вакууме

нение возросло на 10—20 процентов, сжатие поперечного сечения — на 20—40 процентов и ударная вязкость повысилась на 30—40 процентов. Легирование ванадием обеспечило повышение прочностных свойств стали при сохранении высокой пластичности.

Путем обработки в вакууме значительно улучшены свойства кипящей бессемеровской стали. На рис. 11 представлено изменение содержания в этой стали кислорода, водорода и азота в результате обработки жидкой стали в ковше в вакууме. Как видно, содержание кислорода снижается в 5—10 раз, водорода в 2—2,5 раза и азота — на 30—50 процентов.

На рис. 12 показан разрез слитка кипящей бессемеровской стали, обработанной в вакууме.

Слитки, отлитые из кипящей стали, по внутреннему строению, как видно из рис. 12, не отличаются от слитков, отлитых из раскисленной спокойной стали.

Кипящая бессемеровская сталь, обработанная в вакууме, в отличие от обычной, не обнаруживает склонности к хладноломко-

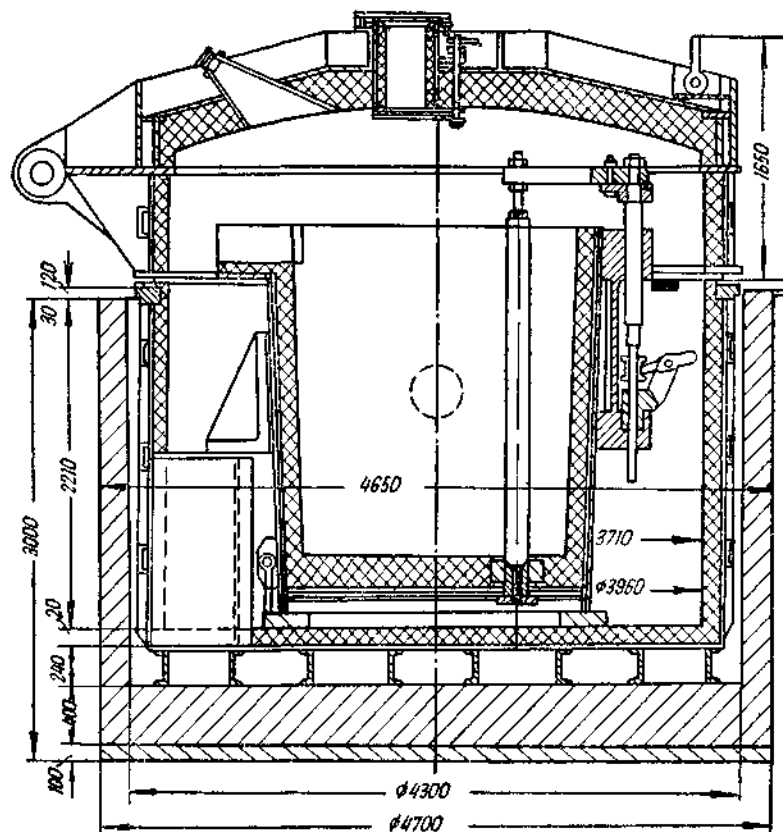


Рис. 10 Схема устройства камеры для обработки жидкой стали в вакууме

сти. На рис. 13 представлены результаты определения ударной вязкости кипящей бессемеровской стали, обычной (две плавки, кривые 1, 2) и обработанной в вакууме (три плавки, кривые 3, 4 и 5). Как следует из представленных здесь данных, порог хладноломкости стали, обработанной в вакууме, наблюдается при минус 40°, тогда как у обычной стали порог хладноломкости близок к 0°.

Вакуумная обработка легированных сталей была осуществле-

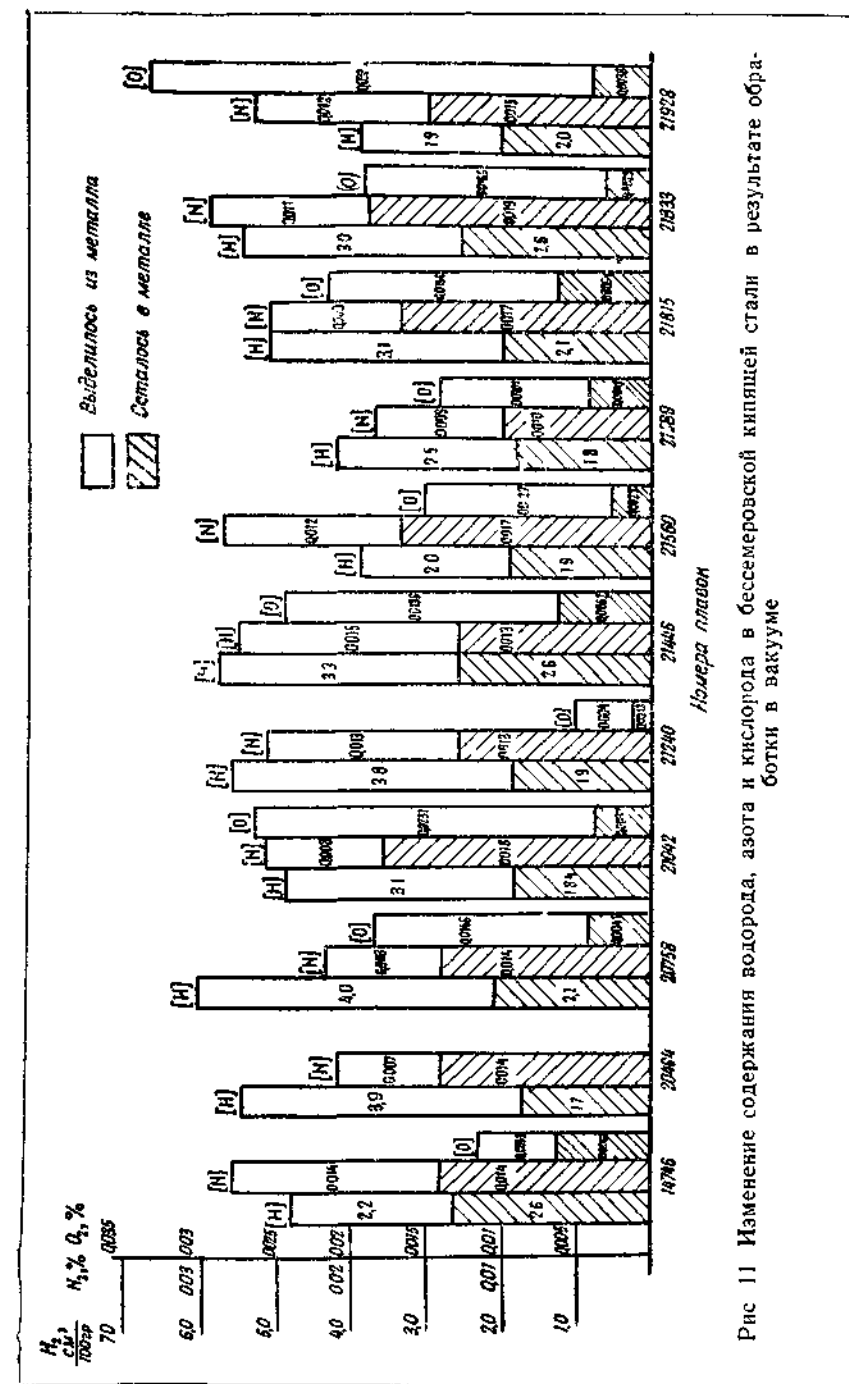


Рис. 11 Изменение содержания водорода, азота и кислорода в бессемеровской кипящей стали в результате обработки в вакууме

Рис 12 Разрез слитка кипящей бессемеровской стали, обработанной в вакууме

на на заводе «Днепроспецсталь» Камеры предназначаются для обработки в ковшах стали, выплавленной в 25-т дуговых электрических печах. Выдержка в камере обычно составляет 10 мин. при остаточном давлении, равном 30—35 мм рт. ст.

До введения этого метода на заводе «Днепроспецсталь» было установлено, что, как уже отмечено выше, трансформаторная сталь, выплавленная в вакуумной индукционной печи, характеризуется меньшими ваттными потерями и повышенной пластичностью. Поэтому в первую очередь вакуумной обработке на за-

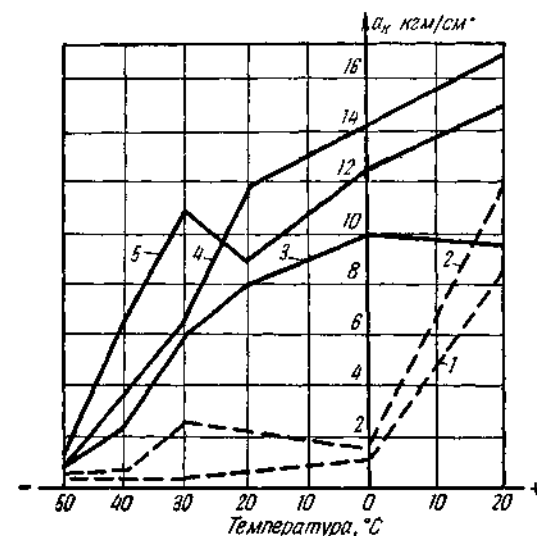


Рис 13 Влияние обработки в вакууме на ударную вязкость кипящей бессемеровской стали

— обработка в вакууме, — — — обычная сталь

воде была подвергнута трансформаторная сталь, в которой углерод, сера и кислород являются вредными примесями. Конечно, при выплавке в дуговых электрических печах можно обеспечить получение этой стали с низким содержанием углерода и серы за счет ведения плавки при повышенной температуре. Однако повышение температуры приводит к получению неплотных слитков трансформаторной стали, из которых нельзя получить тонкий лист при холодной прокатке.

В результате вакуумной обработки полностью было устранено получение рослых слитков, благодаря удалению излишнего количества растворенных в ней газов. Кроме того, была обеспечена возможность получения стали с более низким содержанием углерода, кислорода и серы. На рис. 14 представлены данные о распределении плавок по содержанию в стали углерода и серы. Как видно из рис. 14, почти во всех плавках трансформаторной

стали, не подвергнутых вакуумной обработке (пунктирные линии), содержание углерода было в пределах от 0,04 до 0,09 процента, а содержание серы не ниже 0,007 процента. В результате обработки в вакууме (сплошные линии) стало возможным получение стали, содержащей не выше 0,03% углерода и серы в пределах от 0,003 до 0,005 процента.

В табл. 5 приведены данные об изменении содержания кислорода в трансформаторной стали перед выпуском ее из печи и после обработки в вакууме.

Таблица 5
Изменение содержания кислорода в трансформаторной стали в результате обработки в вакууме

№ плавки	Содержание кислорода в стали, %	
	перед выпуском из печи	после обработки в вакууме
1	0,0054	0,0042
2	0,0079	0,0042
3	0,0062	0,0052
4	0,0049	0,0042
5	0,0095	0,0050
6	0,0080	0,0054
7	0,0135	0,0054

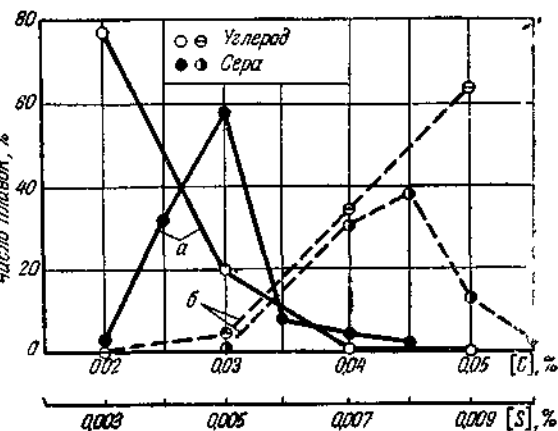


Рис. 14. Влияние обработки в вакууме на содержание углерода и серы в трансформаторной стали
а — плавки, обработанные в вакууме, б — обычные плавки

Во время обработки жидкой стали в вакууме имеют место реакции взаимодействия кислорода с углеродом и кремнием, в результате которых образуются окись углерода и моноокись кремния, удаление которых из металла облегчено при пониженном давлении в вакуумной камере, что и приводит к снижению содержания в стали как углерода, так и кислорода. Перемешивание жидкой стали с высокоосновным и хорошо раскисленным шлаком, при вакуумной обработке, обеспечивает дополнительное очищение металла от серы.

Благодаря снижению вредных примесей, достигнутому в результате обработки жидкого металла в вакууме, ваттные потери трансформаторной стали снижены на 20—25 процентов.

На нескольких заводах СССР введены в эксплуатацию вакуумные камеры, предназначенные для разлива в них крупных слитков — весом до 200 т. Эти слитки, как правило, предназначены для изготовления роторов крупных генераторов и других изделий ответственного назначения.

На рис. 15 приведен чертеж вакуумной камеры с установлен-

ной в ней изложницей [8]. Камера построена на Уральском заводе тяжелого машиностроения.

После установки изложницы камера закрывается, на крышку камеры устанавливается промежуточный ковш, под стопором которого находится алюминиевая пластина, которая изолирует камеру от атмосферы до заливки жидкой стали в промежуточный ковш. Уплотнение между последним и крышкой камеры создается за счет резины. Перед заливкой стали в изложницу давление в камере снижается до 1—10 мм рт. ст. После этого из основного ковша заполняют жидкой сталью промежуточный ковш, а затем из него через алюминиевую пластину (которая, конечно, расплавляется) металл заливают в изложницу.

Струя стали, попадающая в вакуумную камеру, разбивается на капли, а металл в изложнице при заливке кипит.

Вакуумные насосы отключают после окончания заполнения изложницы жидкой сталью; таким образом, окончательное затвердевание стали происходит под атмосферным давлением.

Газы, выделяющиеся при разливе стали в вакууме, состоят из окиси углерода, водорода и азота, причем преобладают в составе газовой смеси окись углерода и водород. Следовательно, в процессе разлива в вакууме сталь дополнительно раскисляется углеродом и очищается от водорода.

Действительно, если содержание неметаллических включений в слитках кислой марганцевой стали, отлитых обычным спосо-

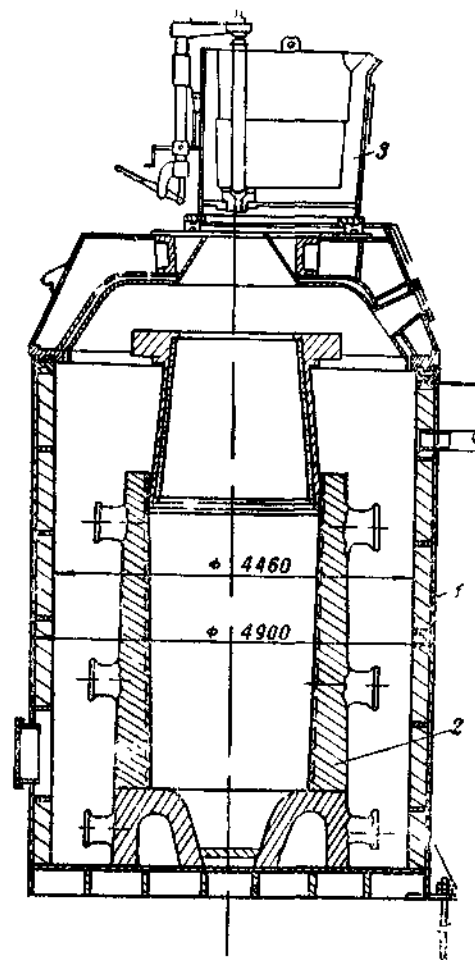


Рис. 15 Камера для отливки стального слитка в вакууме:

1 — вакуумная камера, 2 — изложница, 3 — промежуточный ковш

бом, составляло 0,0182 процента, то в слитках, отлитых в вакууме, среднее содержание неметаллических включений оказалось равным 0,0046 процента, т. е. почти в 4 раза ниже.

Изменение содержания водорода в результате разливки стали в вакууме характеризуется следующими данными:

Сталь	Вес слитков т	Предел содержания водорода в стали, см ³ /100 г	
		до разливки	после разливки в вакууме
Кислая мартеповская . . .	15,0—48,6	2,6—5,6 (4,5)*	1,6—3,8 (2,7)
Основная мартеповская . . .	36,0—87,6	4,8—8,5 (6,8)	2,5—4,1 (3,2)

Как следует из этих данных, во время разливки в вакууме из стали выделяется не менее 40 процентов водорода.

Пониженное содержание водорода и неметаллических включений в стали, отлитой в вакууме, обеспечило устранение флокенов в изделиях, полученных из этих слитков. Естественно, если в стали, отлитой в вакууме, не образуются флокены, то можно значительно сократить длительность операций термической обработки, которые неизбежны при переделе слитков флокеночувствительных сталей, отлитых обычным способом.

Из изложенного следует, что обработка жидкой стали в вакууме приводит к улучшению качества стали, обеспечивает повышение выхода годного. Операции, связанные с обработкой в вакууме, не нарушают нормального течения процесса производства стали на действующих предприятиях. Устройства для обработки в вакууме — вакуумные камеры — просты и могут быть сооружены почти на любом металлургическом заводе. Стоимость эксплуатации вакуумных установок, предназначенных для обработки жидкой стали, ничтожна по сравнению с другими статьями затрат, связанных с производством стали.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ВАКУУМНЫХ ПЕЧЕЙ

Имеются отдельные заявления о том, что применение вакуумных печей не обеспечивает хотя бы незначительного повышения качества стали и сплавов по сравнению с плавками в обычных печах. Причем эти заявления, как правило, подтверждают фактическими данными экспериментальных исследований. Имеются данные, например, что содержание кислорода и азота в металле, выплавленном в вакуумной печи, при наличии весьма низкого давления, оказывается выше, чем в металле, полученном в обычной печи.

Результаты подобных исследований являются в большинстве случаев явным недоразумением и основаны на недостаточном понимании существа процесса выплавки металла в вакууме.

* В скобках дано среднее содержание водорода в данной группе плавов.

Достижение низкого давления в рабочем пространстве индукционных и дуговых вакуумных печей еще не является гарантией получения металла с малым содержанием кислорода и азота. Выше было отмечено, что содержание кислорода может при выдержке жидкого металла в вакууме повыситься за счет взаимодействия его с футеровкой печи. Если этот источник загрязнения кислородом и устранен, тем не менее не исключена возможность загрязнения металла кислородом и азотом.

Не менее важным, чем давление в печи, для достижения положительных результатов в отношении повышения качества металла, выплаваемого в вакуумных печах, является герметизация их рабочего пространства, устранение попадания воздуха в рабочее пространство.

Можно при условии обслуживания печи мощными вакуумными насосами создать весьма низкое давление, но не устранить при этом засоса в печь значительных количеств воздуха. В этом случае поверхность жидкого металла будет омываться воздухом, т. е. металл будет загрязняться и кислородом и азотом. Скорость натекания газа в рабочее пространство (повышение давления в печи в единицу времени при отключениях вакуумных насосов) является поэтому важнейшей характеристикой любой вакуумной печи.

Влияние скорости натекания при выплавке жаропрочного сплава на никелевой основе (Udimet 500; номинальный состав 50% Ni; 18,5% Cr; 18,5% Co; 4,0% Fe; 4,0% Mo; 3,0% Al; 3,0% Ti; 0,08% C) было изучено экспериментально [9]. Скорость натекания воздуха в печь была в пределах от 10 до 300 мрт. ст. в минуту, а все исследованные плавки отливали при наличии давлений в печи, равных только 10—17 мрт. ст.

Результаты этого исследования графически представлены на рис. 16. Как видно, по мере увеличения скорости натекания понижается пластичность сплава и снижается его жаропрочность.

Из данных, приведенных на рис. 17, жаропрочные свойства этого сплава в значительной степени зависят от содержания в нем кислорода.

Для получения в вакуумных печах стали и сплавов с низким содержанием кислорода и азота необходимо обеспечить не только низкое давление в этих печах, но и устранить полностью или снизить до минимальных значений натекание воздуха в рабочее пространство печей.

Поэтому при выплавке стали и сплавов в вакуумных печах должны учитываться два фактора — давление в рабочем пространстве и скорость натекания воздуха в печь. В соответствии с этим требованием вакуумные печи должны быть снабжены аппаратурой, обеспечивающей в процессе плавки контроль давления и скорости натекания.

В меньшей степени эти соображения должны быть распространены и на установки для обработки жидкой стали в вакууме.

ВАКУУМНЫЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

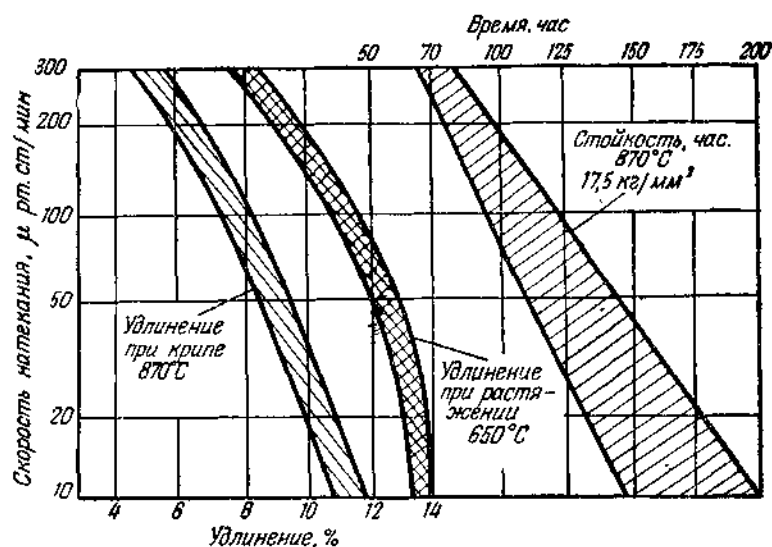


Рис. 16. Влияние натекания воздуха в вакуумную печь на свойства жаропрочного сплава

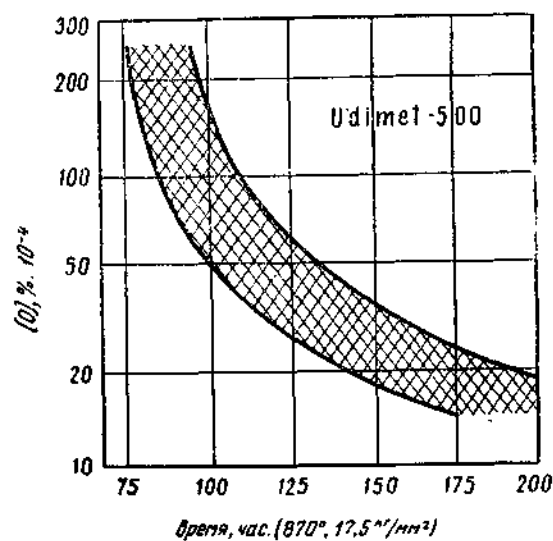


Рис. 17. Влияние кислорода на жаропрочные свойства сплава Udimet-500

Вакуумные печи сопротивления различных конструкций и емкости давно используют в лабораторной и производственной практике.

Несколько лет тому назад крупные вакуумные печи были использованы фирмой «Electromet» для производства феррохрома с весьма низким содержанием углерода (значительно более низким, чем в феррохроме, выплавленном общеизвестными силикотермическими методами). Сущность нового метода: высокоуглеродистый феррохром после его измельчения смешивается с окислителем (фирмой «Electromet» в качестве окислителя был предложен кремнезем); из смеси изготовляют брикеты, выдержка этих брикетов при соответствующей температуре в вакууме и приводит к получению безуглеродистого феррохрома.

Исследование процесса обезуглероживания феррохрома в вакууме в лабораторных условиях было выполнено С. В. Безобразовым [10]. В качестве окислителей были использованы окись хрома, хромовая руда, окись никеля и кремнезем. Брикет из тонкоразмолотых высокоуглеродистого феррохрома и окислителя выдерживали определенное время в вакуумной печи сопротивления. За счет такой выдержки в вакууме содержание углерода в феррохроме снижалось до 0,01—0,03 процента.

Было установлено, что при выдержке брикетов диаметром 30 мм и высотой 30 мм под давлением $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. при 1250—1300° С обезуглероживание заканчивается в течение 10—14 часов. Конечно, скорость обезуглероживания во многом определяется производительностью вакуумных насосов, обслуживающих печь.

В табл. 6 приведены результаты рафинирования высокоуглеродистого феррохрома в вакууме. В качестве исходного сплава был использован феррохром, содержащий, %:

C	Cr	Si	S	P
7,50	65,00	0,80	0,04	0,058

Таблица 6
Химический состав безуглеродистого феррохрома, полученного в вакууме

Окислитель	Химический состав, %						
	C	Cr	Si	Si + SiO ₂	S	P	Ni
Окись хрома . . .	0,01—0,02	74—75	0,4—0,5	—	0,03	0,03	—
Кремнезем . . .	0,03	62—64	—	7,6—8,5	—	—	—
Хромистая руда .	0,02	63—65	1,2—1,4	—	—	—	—
Окись никеля . .	0,03	47—51	—	—	—	—	26—28

Окислитель к высокоуглеродистому феррохрому добавляли в количестве, теоретически потребном для окисления углерода в окись углерода.

Как было упомянуто, при использовании силикотермических методов производства нельзя получить феррохром со столь низким содержанием углерода.

Очищение феррохрома от углерода, как видно, протекает быстрее и более полно, чем при выдержке жидкого феррохрома под окислительным шлаком. Казалось бы, более высокий нагрев при рафинировании жидкого феррохрома должен способствовать ускорению окисления углерода. Лучшие результаты, полученные при обезуглероживании феррохрома в твердом состоянии, можно объяснить следующим образом. В феррохроме практически весь углерод связан в карбидах, выпадающих по границам зерен. По этим границам и происходит главным образом излом при дроблении и разломе, т. е. при измельчении высокоуглеродистого феррохрома карбиды оказываются на поверхности частиц. После прессования в брикетах карбиды находятся в тесном соприкосновении с окислителем. Активность реагентов в этом случае равна единице; в жидком феррохроме и окислительном шлаке активность углерода и кислорода соответственно ниже. Повышение активности реагентов, естественно, способствует как ускорению, так и более полному протеканию реакций обезуглероживания.

Новый метод производства обезуглероженного феррохрома обеспечивает получение сплава с принципиально отличным и более высоким качеством, во-первых, и упрощает схему ферросплавного производства, во-вторых.

Как показано на рис. 18, при силикотермическом методе получения безуглеродистого феррохрома необходимо использовать три дуговые печи: одну — для выплавки передельного высокоуглеродистого феррохрома, вторую — для выплавки силикохрома и третью — для рафинирования силикохрома, с целью получения безуглеродистого феррохрома. Новый метод осуществим при наличии одной дуговой печи и одной вакуумной Затраты на установку оборудования для измельчения высокоуглеродистого феррохрома и окислителя и для изготовления брикетов значительно ниже затрат на строительство дуговой печи. Сокращение номенклатуры сырых материалов, резкое снижение количества шлаков и повышение извлечения хрома из руды — дополнительные источники удешевления этого сплава в случае его производства в вакууме.

Безуглеродистый феррохром, полученный в вакууме рассмотренным методом, может содержать высокий процент окислов, и поэтому было опасение, что использование подсобного феррохрома приведет к получению высокохромистых сталей с повышенным содержанием неметаллических включений, которые могут снизить устойчивость этих сталей против коррозии.

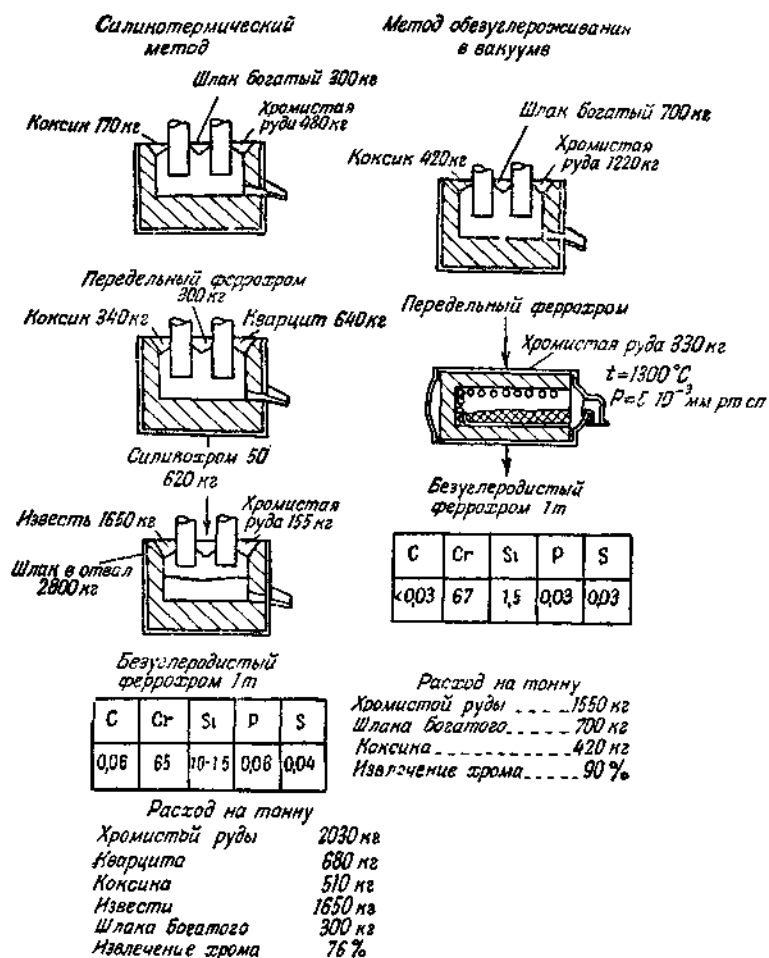


Рис 18 Сравнение двух методов производства безуглеродистого феррохрома

Свойства нержавеющей хромоникелевой стали, выплавленной в индукционной высокочастотной печи с применением обычного безуглеродистого феррохрома и полученного в вакууме (0,01—0,03% С), были изучены А. И. Якуниным.

Были исследованы три группы нержавеющей стали — одна — содержащая 0,07—0,09% углерода, без титана, вторая — с таким же содержанием углерода и с 0,24—0,32% титана и третья — без титана, с содержанием 0,01—0,03% углерода. Устойчивость стали против интеркристаллитной коррозии была определена после закалки для стали с повышенным содержанием углерода при нагреве до 1100° С и для стали с пониженным содержанием углерода — до 1020° С и последующего отпуска стали всех групп при 650°. Устойчивость против общей коррозии была определена на образцах отпущенной стали как потеря веса после четырехкратного 25-часового кипячения в стандартном сернокислотном растворе. Результаты определения склонности исследованных сталей к интеркристаллитной коррозии и устойчивости против общей коррозии приведены в табл. 7. В таблице знаком (+) отмечены стали, устойчивые против интеркристаллитной коррозии, и знаком (—) — обладающие склонностью к этому виду коррозии.

Данные, приведенные в табл. 7, свидетельствуют, что низкоуглеродистая сталь, выплавленная с применением феррохрома, полученного в вакууме, при отсутствии в этой стали титана не склонна к интеркристаллитной коррозии. Склонность к интеркристаллитной коррозии может быть устранена, как известно, дополнительным легированием нержавеющей стали титаном, но титан резко снижает устойчивость стали против общей коррозии.

Развитие производства высокохромистых сплавов, не содержащих железа, связано с потреблением больших количеств металлического хрома, который получают путем восстановления алюминием из окиси хрома или электролизом.

Была изучена возможность получения хрома путем восстановления окиси хрома углеродом в вакууме. При этом была использована вакуумная индукционная печь, в которой нагревательным элементом служил графитовый тигель. В него загружали брикеты из окиси хрома и углерода.

В результате выдержки брикетов в течение 2,5 часов при 1350° С и давлении в рабочем пространстве печи около 1 мм рт. ст. получали губку хрома, содержащую 0,05—0,07% углерода; в некоторых опытах содержание углерода в губке снижалось до 0,03 процента.

Подобное содержание углерода в хrome в упомянутых условиях оказывается возможным при наличии в брикетах избытка окиси хрома. При отсутствии избытка восстанавливаемого окисла указанное содержание углерода достижимо при более высоких температурах. С другой стороны, повышение температуры приводит к повышению потерь хрома за счет его испарения.

В табл. 8 приведены данные о содержании примесей в метал-

Таблица 7
Влияние углерода и титана на склонность нержавеющей хромоникелевой стали к интеркристаллитной коррозии и устойчивость против общей коррозии

№ плавки	Содержание в стали, %		Склонность к интеркристаллитной коррозии	Потери веса г/м²/час
	углерода	титана		
1	0,07	—	(—)	0,620
2	0,09	—	(—)	12,060
3	0,07	—	(—)	1,900
4	0,08	—	(—)	4,432
5	0,09	—	(—)	3,600
6	0,07	0,24	(+)	12,110
7	0,09	0,32	(+)	23,950
8	0,02	—	(—)	0,126
9	0,03	—	(+)	0,131
10	0,02	—	(+)	0,138
11	0,01	—	(+)	0,239
12	0,02	—	(+)	0,171

лическом хrome, полученном различными методами — электролизом, алюминотермическим методом и восстановлением окиси хрома углеродом в вакууме.

Как видно, хром, полученный восстановлением окиси хрома углеродом в вакууме, по содержанию примесей равноценен хрому, полученному другими методами.

Таблица 8
Содержание примесей в металлическом хrome, полученном различными методами

Метод получения	Содержание примесей, %			
	C	Si	S	P
Электролиз	0,06	0,009	0,04	0,008
Алюминотермический	0,03	0,014	0,01	0,012
Восстановление в вакууме	0,02—0,06	0,010	0,02	0,100

Метод восстановления углеродом в вакууме находит применение и при получении других металлов из их окислов.

БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Применение вакуума внесет существенные изменения в технологию производства стали.

Например, если за счет обработки бессемеровской стали в вакууме можно получить слитки кипящей мягкой стали без пузырей и с пониженной степенью сепарации, то эта сталь будет устойчивой против старения, что в свою очередь открывает новые возможности расширения области применения конвертерной стали. Способ производства стали в конвертерах, как известно, является высокопроизводительным и наиболее дешевым. Применение вакуумной обработки, очевидно, исключит необходимость использования кислорода при получении стали в конвертерах. Если одновременно с заливкой жидкой стали из бессемеровского конвертера в ковш будет залит основной шлак, который затем при выдержке ковша в вакуумной камере будет энергично перемешиваться со сталью, то возможно обеспечить получение бессемеровской стали с пониженным содержанием серы и неметаллических включений. Таким образом, за счет обработки в вакууме возможно получение конвертерной стали, по качеству равноценной мартеновской.

Развитие реакций обезуглероживания при обработке жидкой стали в вакууме должно внести изменение в процессы выплавки многих сталей в мартеновских и электрических дуговых печах. Отпадет необходимость снижения содержания углерода до заданного (порою довольно низкого) в процессе плавки, если дополнительно можно будет удалять углерод в ковше. За счет этого сокращается продолжительность плавки и повышается стойкость футеровки сталеплавильных печей. Общеизвестно, что получение стали с низким содержанием углерода требует более высокого нагрева жидкого металла, наличия шлаков с высоким содержанием в нем окислов железа, что сопровождается усиленным износом футеровки печей.

Коренным образом может и должна быть изменена технология выплавки различных нержавеющих сталей. Ныне для их выплавки используют дуговые электрические печи, разливку ведут на воздухе. Выход особо тонких листов нержавеющей хромоникелевой стали, например, редко превышает 60 процентов от веса слитков. Иначе — производство этой стали связано с необходимостью использования большого количества отходов, переплав которых сопровождается значительными потерями хрома.

В будущем процесс производства этой стали можно представить в следующем виде.

Дуговые электрические печи будут использованы для выплавки нержавеющей стали, в качестве металлической садки будут применены обычный стальной лом или жидкий металл, полученный в конвертере или мартеновской печи. Нержавеющую сталь будут разливать не в слитки, а в заготовки для изготовления из них электродов, предназначенных для переплава в дуговой вакуумной печи. Размер заготовок должен быть сообразован с размерами электрода дуговой вакуумной печи, причем могут отливаться заготовки длиной несколько метров при относительно не-

большом их диаметре (скажем, длиной 3 м и диаметром 200 мм), так как внутреннее строение заготовки, предназначенной для переплава, не имеет существенного значения.

В дуговой вакуумной печи, в результате переплава заготовок в медном кокиле, будут получены слитки, предназначенные для дальнейшего передела. Чем же будут эти слитки отличаться от ныне отливаемых обычным методом? Во-первых, будет получена сталь с более низким содержанием в ней углерода, неметаллических включений; слитки, полученные в дуговой вакуумной печи, более однородны по кристаллическому строению и химическому составу. Во-вторых, за счет устранения окисления при разливке, будут получены слитки без поверхностных дефектов или по крайней мере со слабо выраженными дефектами поверхности. В-третьих, в слитках, полученных в дуговой вакуумной печи, отсутствует усадочная раковина. Переплав в дуговой вакуумной печи, конечно, связан с дополнительной затратой электрической энергии — порядка 500 кВт-ч на тонну стали, но повышение выхода годных листов, скажем до 70 процентов вместо 55, окупит дополнительные затраты.

Отходы нержавеющей стали должны переплавляться не в дуговых электрических печах, а в индукционных высокочастотных. При этом будет обеспечена выплавка стали с низким содержанием углерода без применения в процессе плавки кислорода, при весьма низких потерях хрома.

Имеются ли реальные возможности для осуществления подобного метода выплавки нержавеющих сталей?

Если в 40-т дуговой электрической печи в сутки будет выплавлено 160 т нержавеющей стали, то для переплава этой стали требуется установить две дуговые вакуумные печи мощностью около 1500 кВт каждая. Отходы производства нержавеющей стали при этом методе выплавки в сутки составят 24 т. Для переплава этих отходов необходимо установить вакуумную индукционную печь емкостью 2—3 т. Изготовление и эксплуатация вакуумных дуговых и индукционных печей указанной мощности и емкости являются вполне возможными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Гарнык и А. М. Самарин. Вакуумная плавка трансформаторной стали — *Сталь*, № 6, 1956, стр. 514—518; Г. А. Гарнык. Состав и свойства трансформаторной стали, выплавленной в вакууме. Сб. «Применение вакуума в сталеплавильных процессах». Металлургиздат, 1957, стр. 81—102.
2. А. М. Самарин. Раскисление и десульфурация трансформаторной стали в вакууме. Сб. «Применение вакуума в сталеплавильных процессах». Металлургиздат, 1957, стр. 3—14.
3. Р. С. Беляков и А. М. Самарин. Влияние метода выплавки на свойства нержавеющей стали. — *Бюллетень Центрального Института информации ЦНИИЧЕРМЕТ*, Metallurgizdat, 21 (329), 1957, стр. 8—14.
4. А. А. Яскевич и А. М. Самарин. Влияние ниобия и титана на свойства нержавеющей стали. — *Изв. АН СССР, ОТН*, № 10, 1955, стр. 107—116.

5. Б. В. Линчевский, А. М. Самарин. Растворимость кислорода в расплавах железо-хром и железо-хром-никель. — Изв. АН СССР, ОТН, № 5, 1953, стр. 681—704.

6. С. В. Безобразов и А. М. Самарин. Растворимость кислорода в расплаве железа, хрома и никеля. — Изв. АН СССР, ОТН, № 12, 1953, стр. 1790—1796.

7. А. М. Самарин, Л. М. Новик, Н. И. Гончаренко и А. Ф. Трегубенко. Обработка жидкого металла в вакууме. — Сталь, № 8, 1956, стр. 700—707.

8. В. К. Новоицкий. Конструкция вакуумной установки для отливки крупных слитков весом до 120 т. Сб. «Применение вакуума в металлургии». Изд. АН СССР, 1958, стр. 107—111.

9. W. E. Jones. Vacuum induction — melting process consideration — Metal Progress, 1957, pp. 133—138.

10. С. В. Безобразов. Получение безуглеродистого феррохрома путем обезуглероживания углеродистого феррохрома в вакууме. Сб. «Применение вакуума в металлургии». Изд. АН СССР, 1958, стр. 155—162.

11. А. М. Самарин и А. А. Вертман. Получение хрома и безуглеродистого феррохрома методом вакуум-спекания. — Груды Института металлургии им. А. А. Байкова, т. 1, 1957, стр. 60—66.

Автор
САМАРИН Александр Михайлович

Редактор издательства *А. И. Лебедев*
Технический редактор *И. М. Эвенсон*

Сдано в производство 23/IX 1958 г.	Подписано в печать 29/X 1958 г.
Бумага 60×92 ¹ / ₁₆ —1,13 бум. л. = 2,25 печ. л.	Уч.-изд. л. 2,08
T-11259	Тираж 4665
Заказ 705	Цена 1 р. 05 к.

Типография Металлургиздата, Москва, Цветной б., 30