

Долгий Л.П., Слущкий А.Г., Касперович И.А.
Белорусский национальный технический университет

Научно-технический прогресс (НТП) в различных областях техники резко повышает требования к качеству потребляемой металлопродукции, что вызывает необходимость разработки процессов и оборудования, обеспечивающих производство особо чистых металлических материалов, свободных от вредных примесей, неметаллических включений и обладающих заданными механическими свойствами. Эти процессы получили название специальной металлургии. К ним можно отнести в том числе плавку металлов и сплавов в вакуумных индукционных печах (ВИП).

Общим преимуществом плавки в вакуумных печах является пониженное содержание газов и неметаллических включений (НВ) в полученном металле. Под вакуумом понимают любое состояние газовой среды с давлением ниже атмосферного. В вакуумных индукционных печах используют обычно средний вакуум от $1 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст.

Известно, что при плавке в вакууме ряд физико-химических процессов имеет специфические особенности, а именно: интенсивно выделяются газы из металла, заметно испаряются как основные компоненты сплава, так и их примеси с высокой упругостью пара. При этом становится возможным глубокое раскисление металла углеродом, восстанавливаются и удаляются неметаллические включения, идут активные процессы между металлом и футеровкой.

Основными физико-химическими процессами, протекающими в вакууме, являются:

1. Дегазация металла от водорода и азота. Например, для получения содержания водорода в металле $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. достаточно, чтобы остаточное давление при 1600°C составляло около 1 мм.рт.ст. Азот имеет более низкий коэффициент диффузии, чем водород, в результате чего он удаляется при вакуумной плавке значительно труднее.

2. Испарение компонентов жидкого металла, которое зависит от упругости пара и скорости испарения при данных значениях температуры и от давления газовой фазы над расплавом. Наиболее высокой упругостью пара в условиях плавки в вакууме обладают такие основные компоненты как Mn и в меньшей степени Cr и Si. Из примесей известных металлов наиболее благоприятные условия для удаления испарением имеют Sn и Cu. Заметные потери хрома путем испарения наблюдаются при повышенном его содержании. Молибден и вольфрам не испаряется в жидкой стали. Потери этих элементов могут иметь место при повышенном содержании в стали кислорода, при этом окислы Mo и W весьма летучи. Такие элементы как титан и алюминий также испаряются при вакуумной плавке, но весьма легко окисляются и всплывают на поверхность ванны.

3. Раскисление металла. Наиболее благоприятные условия для раскисления металла в вакууме создаются в том случае, когда продукты раскисления образуются в виде газа, например при раскислении углеродом, которые непрерывно удаляются из объема печи.

Однако в действительности раскислительная способность углерода резко падает и даже при снижении давления до $1 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст. Объясняется это тем, что в газовых пузырьках CO, которые образуются на шероховатых поверхностях футеровки гораздо более высокое парциальное давление CO, чем в расплаве. В результате этого затрудняется агрегация CO.

Более глубокое раскисление стали может быть выполнено дополнительным введением Al и Ce. При раскислении Al количество кислорода снижается до 0,002-0,003% для Fe-C и до 0,004-0,005% для Fe-Cr сплавов. Еще меньше содержание при раскислении Al и Ce.

Введение в сталь Si и Mn практически не изменяет содержание кислорода в стали.

4. Восстановление и удаление неметаллических включений.

Термодинамические расчеты показывают [1], что в условиях вакуума углерод, находящийся в расплаве, способен восстанавливать Mn и Cr из оксидов (MnO, Cr₂O₃) и в меньшей

степени Si из SiO₂. При этом уменьшается количество крупных НМВ (неметаллических включений). Для возможности восстановления тугоплавких окислов таких элементов как Ti, Al, V, Se плавку ведут при повышенной температуре. Уменьшение количества НМВ объясняется не только более успешным восстановлением и более интенсивным всплыванием их вместе с пузырьками газа CO, но и самостоятельно в результате снижения вязкости металла и его перемешиванием.

5. Диссоциация компонентов огнеупорной футеровки и ее взаимодействие с жидким металлом.

При вакуумной плавке металла происходит разрушение футеровки в результате механического воздействия жидкого металла, повышенной диссоциации в вакууме некоторых компонентов, а также восстановление отдельных компонентов футеровки при химическом взаимодействии с элементами, находящимися в составе металла.

К увеличению потерь приводит повышенное содержание SiO₂ в футеровочных материалах. Поэтому из-за недостаточной стойкости SiO₂ в условиях вакуума кислая футеровка в таких плавильных печах не применяется. Наиболее часто в индукционных вакуумных печах применяют магнезитовую футеровку.

Взаимодействие между компонентами футеровки и углеродом происходит и в том случае, когда она выполнена преимущественно из Al₂O₃ или ZrO₂. Химическое взаимодействие металла с компонентами футеровки усиливается при повышенном содержании в металле Cr, Al и других активных элементов.

Таким образом, преимуществом плавки в индукционных вакуумных печах является глубокая дегазация металла, возможность удаления примесей ряда цветных металлов и возможность выплавки сталей и высокотемпературных сплавов практически любого состава.

К недостаткам технологии ВЭП можно отнести повышенное взаимодействие расплава с компонентами футеровки, что снижает ее стойкость и обычно составляет несколько десятков плавок. Данная технология имеет худшие ТЭП по сравнению с обычными индукционными печами. Кроме этого конструкция комплекса предполагает наличие ряда вспомогательного оборудования (вакуумные насосы, гидро- или пневмопривод и др.), что увеличивает его габариты и усложняет технологический процесс плавки и обслуживание вакуумной установки.

Литература

1. Е.Б. Качанов Методы спецметаллургии – основа производства высококачественных сталей и сплавов. – с. 81-83.