

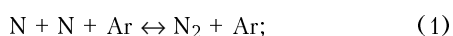


**Письмо в редакцию по поводу замечаний В. И. Лакомского
к статье А. А. Хохлова «Исследование взаимодействия азота
с жидкой сталью при плазменной выплавке»,
опубликованных в журнале
«Пробл. спец. электротметаллургии». — 2000. — № 1**

А. А. Хохлов

Для понимания процессов, происходящих на межфазной границе газ — металл, необходимо было определить состав плазмы на верхней границе пограничного слоя в газе, примыкающего к металлу. В этой связи был определен состав плазмы на участке от катода плазматрона до верхней границы пограничного слоя в газе. Из данных, представленных на рис. 1 работы [1], следует, что с увеличением температуры концентрация молекул азота снижается, а концентрация атомов азота достигает максимума при $T = 8000$ К. При дальнейшем повышении температуры ($T > 8000$ К) увеличивается доля ионов азота. Расчеты проведены для давления 1270 ГПа, так как плавки по легированию стали азотом из газовой фазы осуществлялись при этом давлении.

Читая критические замечания, создается впечатление, что В. И. Лакомский не изучил рис. 2 работы [1], на котором справа показан состав плазмообразующего газа (70 % Ar и 30 % N₂), попадающего в плазменную дугу, где в основном идут реакции: диссоциации молекул азота ($N_2 \leftrightarrow N + N$), ионизации атомов азота ($N \leftrightarrow N^+ + e$) и молекул азота ($N_2 \leftrightarrow N_2^+ + e$). На верхней границе пограничного слоя в газе при температуре 10500 К плазма имеет следующий состав: 70 % Ar; 0,5 % N₂; 13,1 % N; 8,2 % N⁺; 8,2 % e. Частицы плазмы, проходя охлажденный пограничный газовый слой, примыкающий к металлу, претерпевают коренные изменения. Происходит молизация атомов азота в основном по реакциям:



Состав газа, контактирующего с металлом, в предположении, что идет только реакция (1), сле-

© А. А. ХОХЛОВ, 2001

дующий: 70 % Ar; 29,95 % N₂; 0,005 % N, по реакции (2) — 70 % Ar; 29,94 % N₂; 0,06 % N. Здесь же показана расчетная толщина пограничного слоя в газе — 7 мм, толщина пограничного слоя в металле — 0,01 мм. Температура металла на оси плазменной дуги при силе тока 1000 А принята равной температуре кипения стали (3200 К) при давлении 1270 ГПа, но не 10500 К, как утверждается в работе [2]. При температуре кипения может находиться сталь толщиной в несколько атомных слоев.

Слева на рис. 2 работы [1] указано численное значение коэффициента массопереноса в пограничном газовом слое ($\beta_T = 0,75$ м/с), примыкающем к металлу. Коэффициент массопереноса в пограничном слое в металле составляет $\beta_{me} = 6 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Переходя к обсуждению полученных результатов, следует отметить, что автор настоящей работы не абсолютизирует численных значений концентраций частиц плазмы на верхней границе пограничного слоя в газе и состав газа, контактирующего с металлом. Тем не менее, из рис. 1, 2 работы [1] следует, что в плазменной дуге даже при относительно небольшой силе тока 1000 А на расстоянии 130 мм от катода плазматрона при температуре 10500 К происходит практически полная диссоциация молекулярного азота на атомы. Очевидно, что дальнейшее увеличение силы тока не может существенно повысить концентрацию атомов азота на верхней границе пограничного слоя в газе и в газовой фазе на границе с металлом. Содержание азота в стали при увеличении силы тока и соответственно диаметра плазменной дуги повышается незначительно. В работе В. И. Лакомского [3] вообще не обнаружено влияния силы тока ни на кинетику процесса, ни на величину порогового значения концентрации азота. Если с металлом взаимодействуют колебательно возбужденные молекулы, то при увеличении силы тока



(или мощности) должен, казалось бы, повыситься уровень нерелаксированной колебательной энергии и, следовательно, содержание азота в стали должно быть высоким. Однако этого не происходит, поэтому можно поставить под сомнение решающую роль колебательно возбужденных молекул при насыщении металла азотом в процессе плазменно-дуговой выплавки.

Другой экспериментальный факт, наблюдаемый при плазменно-дуговой выплавке, заключается в увеличении содержания азота в стали при уменьшении длины плазменной дуги. Это объясняется тем, что с уменьшением длины дуги снижается толщина пограничного газового слоя (за счет увеличения скорости набегающего потока плазмы на металлическую ванну) и к поверхности металла подходит больше короткоживущих атомов азота. Время жизни колебательно возбужденной молекулы очень большое и составляет около 1 с. Если ответственным за содержание азота в стали были бы долгоживущие колебательно возбужденные молекулы азота, то в случае изменения (уменьшения или увеличения) толщины пограничного слоя в газе это обстоятельство никак бы не сказывалось на содержании азота в стали. Однако на практике длина плазменной дуги оказывает влияние на содержание азота в стали, что нашло отражение в технологических инструкциях на выплавку в промышленных плазменных печах.

Из списка рекомендованной В. И. Лакомским литературы следует отметить работу [4], авторы которой считают, что в периферийных областях

анодного пятна наиболее вероятен контакт с возбужденными молекулами, а в центральной части пятна не исключено взаимодействие с частично замороженной плазмой, содержащей атомы азота. В настоящей работе как раз и рассматриваются процессы, происходящие на оси дуги. Кроме того, авторы работы [4] справедливо замечают, что среди исследователей не установилось единого мнения о степени активации частиц, растворяющихся в металле при плазменном нагреве. Автор настоящей работы считает, что возникшая дискуссия может быть разрешена только путем экспериментальных исследований плазменных дуг, т. е. получением прямых, а не косвенных доказательств.

1. Хохлов А. А. Исследование взаимодействия азота с жидкой сталью при плазменной выплавке // Прогрессивные материалы и технологии. — 1999. — № 3. — С. 76–79.
2. Лакомский В. И. Некоторые критические замечания к статье А. А. Хохлова «Исследование взаимодействия азота с жидкой сталью при плазменной выплавке» // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 1. — С. 78–81.
3. Абсорбция азота из плазмы ванны жидкого металла / В. И. Лакомский, Г. М. Григоренко, Г. Ф. Торхов, Б. А. Дворянkin // Физика и химия обработки материалов. — 1974. — № 6. — С. 47–51.
4. Латаш Ю. В., Торхов Г. Ф., Костенко Ю. И. Абсорбция газа жидким металлом по радиусу пятна нагрева дуговой плазмы // Там же. — 1987. — № 3. — С. 61–67.

Центральный научно-исследовательский институт
конструкционных материалов, Санкт-Петербург
Поступила 07.12.2000

Краткий ответ А. А. Хохлову на его письмо в редакцию журнала «Проблемы специальной электрометаллургии»

В. И. Лакомский

Прочитав письмо А. А. Хохлова в редакцию, приходится, к сожалению, констатировать, что господин Хохлов либо не понял, либо не воспринял мои замечания к его статье [1] и поэтому я вынужден снова вкратце повторить их.

Неправильное представление А. А. Хохлова о процессах взаимодействия азота из плазмы с жидким металлом, на мой взгляд, объясняется его пренебрежением положениями плазмохимии гетерогенных реакций, а именно:

недостижимость термодинамического равновесия в любой системе металл — плазма диатомного (или полиатомного) газа;

системы металл — газовая плазма независимо от длительности процесса взаимодействия всегда

находятся в стационарном состоянии, когда действуют два диффузионных потока: один из плазмы в металл, другой навстречу ему из металла в газовую фазу;

энергия газовых частиц из плазмы в металл, которая определяется релаксационными процессами в пограничном газовом слое, намного превышает энергию частиц обратного газового потока;

концентрация газа в металлической ванне определяется кинетикой двух противоположных газовых потоков, которые в свою очередь определяются двумя кинетическими параметрами — площадью пятна на поверхности металла, через которое газ поступает в объем жидкого металла из плазмы, и площадью поверхности, через которую растворившийся и отдавший металлу свою избыточную энергию газ покидает металл [2].