



(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. Дворякин // 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].



Если бы А. А. Хохлов придерживался этих известных и неоднократно доказанных положений, то он не стал бы связывать поглощение азота жидкой сталью из газовой плазмы с температурой последней в самом плазменном макротокке и определять степень диссоциации и ионизации азота в столбе электрической дуги.

Концентрация азота в жидкой стали зависит от энергии молекул непосредственно у поверхности металла. Эта энергия определяется релаксационными процессами, протекающими в пограничном с металлом газовом слое, и не зависит от предыстории газовых частиц азота — были ли они в ионном или диссоциированном состоянии.

Если поверхность жидкой стали нагрета ниже точки нормального кипения железа, то какой бы ни была высокая энергия азота она будет релаксирована на пути к металлу через пограничный слой в газовой фазе и в соприкосновение с металлом молекулы азота придут с избыточной колебательной энергией, равной 1,55 эВ, как это было показано в работе [3]. В связи с этим искать связь между силой тока электрической дуги и концентрацией азота в стали, как это делает господин Хохлов, бесперспективно.

Надо думать о другом. А. А. Хохлов правильно отмечает, что с ростом силы тока дуги растет и диаметр столба дуги, но не дает этому должного развития. А следовало бы связать рост силы тока дуги с ростом диаметра, и разумеется, площади поверхности опорного пятна дуги на зеркале металла, через которое проникает в металл диффузионный поток азота из плазмы. Если при этом не вырастет пропорционально площадь поверхности металла, через которую азот покидает металлическую ванну, то это приведет к росту установившейся концентрации азота в жидкой стали [2].

Если же поверхность стальной ванны, как понимает А. А. Хохлов, нагрета до точки кипения железа, то никакой сорбции азота жидким металлом при этом не будет, ибо у поверхности металла не будет частиц азота — они будут оттеснены парами металла.

Надо сказать, что при плазменной плавке в системе всегда соблюдается механическое равновесие, т. е. во всех точках системы наблюдается

одинаковое давление, равное атмосферному. В ядре плазменного потока $P_{пл} = 1$ атм, у поверхности кипящего металла $P_{Ме} = 1$ атм, а $P_{пл} = 0$. На некотором расстоянии от металла в пограничном газовом слое $P_{Ме} + P_{пл} = 1$ атм. Как может азот проникать в металл, если его нет у поверхности металла, если он не взаимодействует с металлом?

В заключение своего письма А. А. Хохлов пишет, что «возникшая дискуссия может быть разрешена только путем экспериментальных исследований плазменных дуг...», прекрасно зная, что при нынешнем состоянии экспериментальной техники изучить молекулярный состав азота на границе раздела газ — металл при плазменной плавке весьма и весьма проблематично.

Нет, господин Хохлов, в таких случаях, если нужно, и в науке пользуются феноменологическими методами, когда используются аналогичные, но хорошо изученные явления, разрабатывается рабочая гипотеза (теория) и с ее помощью пытаются объяснить все наблюдаемые в опытах явления. Удачной, принятой теорией считается та, которая объясняет большинство экспериментальных фактов. В нашем случае задача облегчается тем, что подобные явления и в теоретическом, и в практическом плане развиты при решении проблемы возвращения в атмосферу Земли космических летательных аппаратов.

Если в своей практике А. А. Хохлов будет исходить из вышеприведенных положений плазмохимии гетерогенных процессов, то он сможет объяснить все наблюдавшиеся до сих пор и не нашедшие ранее объяснений с позиций формальной термодинамики экспериментальные факты. Публикуя этот ответ, автор надеется, что на этом предмет дискуссии исчерпан.

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. О макрокинетике процесса взаимодействия азота из электродуговой плазмы с расплавленным металлом // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1998. — № 1. — С. 56–65.
3. Lakomsky V. I. Alloying liquid metal with nitrogen from electric arc plasma. — Cambridge, ISP, 1999. — 223 p.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Поступила 16.01.2001