



УДК 669.187.58.002.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОГО НАГРЕВА ПРИ ПЛАВКЕ И СПИННИНГОВАНИИ РАСПЛАВА

М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. Ф. Торхов,
Ю. А. Никитенко, В. Р. Бурнашев

Изучено влияние основных технологических параметров плазменно-дуговой гарнисажной плавки на распределение температуры в расплаве. Определено изменение температуры керамического сопла установки ОП-133 в процессе спиннингования расплава.

Effect of main technological parameters of plasma-arc skull melting on distribution of temperature in melt was studied. The change in temperature of a ceramic nozzle of OP-133 unit in the process of melt spinning was determined.

Ключевые слова: плазменно-дуговой нагрев; градиент температуры; температурное равновесие; спиннингование расплава; аморфные металлы

Исследование распределения температуры в ванне жидкого металла, а также умение управлять градиентом температуры в технологических процессах плавки металла позволит достичь их оптимизации и сэкономить электроэнергию. Особенно актуально это для установок, в которых применяют мощные источники нагрева, такие как плазма, электронный луч и лазер.

В настоящей работе исследовано распределение температуры в расплаве на опытной установке для производства быстрозакаленных металлических лент ОП-133. В качестве источника нагрева здесь применяют плазматрон постоянного тока с максимальным рабочим током до 1200 А.

Как известно, плазменная дуга является достаточно мощным и концентрированным источником нагрева. Температура внутри ее может достигать нескольких десятков тысяч градусов [1]. Управление мощным тепловым потоком и контроль за распределением температуры являются довольно сложными задачами, если учесть, что масса обрабатываемого металла небольшая — не более 1 кг.

Получение аморфных и квазиаморфных металлических лент осуществляется способом спиннингования. При этом металл расплавляется под действием плазменно-дугового нагрева в медном водоохлаждаемом гарнисажном тигле. При полном рас-

плавлении металла и достаточном прогреве сливного сопла, расположенного в центре донной части тигля (рис. 1), в камере создается избыточное давление инертного газа. Под его действием расплавленный металл выдавливается через щель сливного сопла на вращающийся барабан-холодильник. На его холодной поверхности металл быстро затвердевает в виде ленты, имеющей аморфную или микрористаллическую структуру, а затем под действием центробежных сил отделяется.

В настоящей работе проведено исследование изменения температуры в керамическом сопле и на разной глубине расплава непосредственно под плазматроном. При этом изучали влияние на распределение температуры некоторых технологических параметров. Контрольные точки замера температуры расплава выбирали на разных уровнях по оси плазматрона.

На приближенной модели плавильной емкости указаны контрольные точки, в которых осуществляли замер температуры (рис. 1).

Глубина фиксации термопары от уровня ванны составляла для точки № 1 — 9 мм, № 2 — 20 мм; точка № 3 находилась непосредственно в верхней части щели сливного сопла и предназначалась для замера температуры при разных режимах плавки; точка № 4 располагалась в отверстии с наружной стороны щели сливного сопла на расстоянии 3 мм от расплава. В этой точке удалось зафиксировать весь процесс изменения температуры при спиннинговании расплава на вращающийся барабан-холодильник.

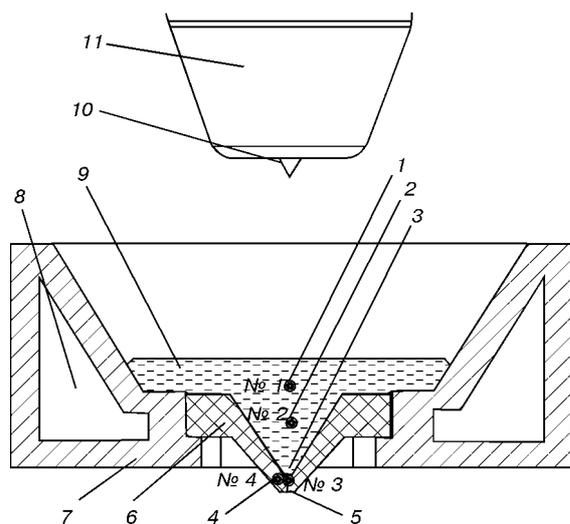


Рис. 1. Схема плавильного устройства установки ОП-133: 1-4 — точки, в которых зафиксированы термопары; 5 — щель сливного сопла; 6 — керамическое сливное сопло; 7 — медный водоохлаждаемый тигель; 8 — канал для водоохлаждения тигля; 9 — ванна расплавленного металла; 10 — вольфрамовый катод; 11 — сопло плазмотрона

Существует несколько способов измерения температуры расплава при плазменно-дуговом нагреве, некоторые из них отличаются большой трудоемкостью и требуют сложного оборудования [2, 3], при этом возможно измерить температуру лишь на поверхности расплава. Однако для получения более полной картины градиента температуры по оси плазмотрона необходимо осуществить замеры внутри расплава. Самые простые и довольно точные способы измерения выполняли с помощью контактного способа [4] с использованием стандартных вольфрам-рениевых термопар типа ВР 5/20 (ГОСТ 3044-77).

Термопару вводили в расплав в кварцевом наконечнике снизу через щель сливного сопла. Замеры температуры (рис. 2) проводили в серии плавки с постоянной массой металла (500 г) при расходе плазмообразующего газа 9...10 л/мин и давлении в камере 105 кПа. В качестве модельного сплава выбрали сплав на никелевой основе ПРН-88 с температурой плавления, близкой 1000 °С. В процессе экспериментов измеряли ток дуги, напряжение между катодом и расплавом, длину дуги. Изменение термоЭДС фиксировали с помощью самопишущего потенциометра типа РП-160, который тарировался по эталонному источнику.

Перегрев расплава в точке № 1, расположенной не намного ниже уровня ванны расплавленного металла, объясняется физическими процессами, протекающими при плазменно-дуговой плавке. В процессе плавки под действием плазмообразующего газа и электрической дуги происходит продавливание ванны расплавленного металла. Давление дуги на расплав практически полностью определяется газодинамическим воздействием макроскопических потоков плазмы (динамическая составляющая) и сжатием столба дуги (статическая составляющая). Суммарное действие

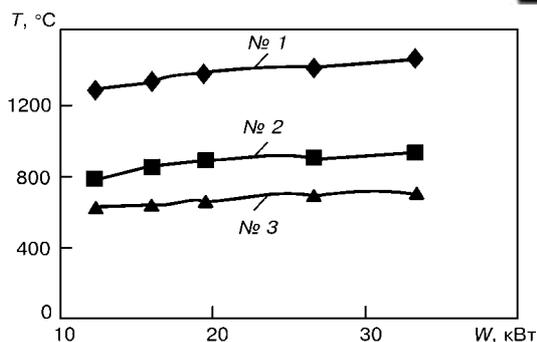


Рис. 2. Изменение температуры в расплаве в зависимости от мощности W плазмотрона при длине дуги 75 мм (№ 1-3 — см. рис. 1)

электронного и ионного потоков, а также реактивной силы испаряющегося металла при дуговом нагреве незначительно [5]. Для выбранного сплава продавливание может иметь глубину приблизительно 5...7 мм. Из этого следует, что термопара находилась в контакте с поверхностными слоями расплава, перегреваемыми плазменной дугой. Температура плазмы возле анода («расплава») гораздо ниже, чем в прикатодной области, но все же может достигать нескольких тысяч градусов [6].

Чем ближе к поверхности расплава, тем значительнее изменение температуры металла, что связано с некоторыми колебаниями дуги на поверхности расплава. Нестабильность дуги обусловлена несколькими факторами, которые по-разному влияют на место привязки дуги к расплаву. К ним можно отнести динамическую пульсацию плазмообразующего газа, эрозию катода и привязку дуги к различным точкам, движение крупных магнитных масс вблизи камеры плавления, создающих «магнитное дутье», а также перемещение шлака по поверхности ванны расплавленного металла.

Первый фактор обусловлен применением гибких шлангов, что приводит к незначительным изменениям их пропускной способности и колебаний в области собственных резонансных частот или возникновению местных завихрений в газовой системе. Эрозия катода при больших токах всегда являлась проблемой для металлургических плазмотронов, поскольку в процессе плавки происходит его обгорание (рис. 3, а). Однако обгоревший вольфрамовый катод можно заменить либо частично восстановить путем заточки его рабочей части (рис. 3, б). К магнитным массам относятся вращающийся массивный барабан-холодильник и его рабочий привод,

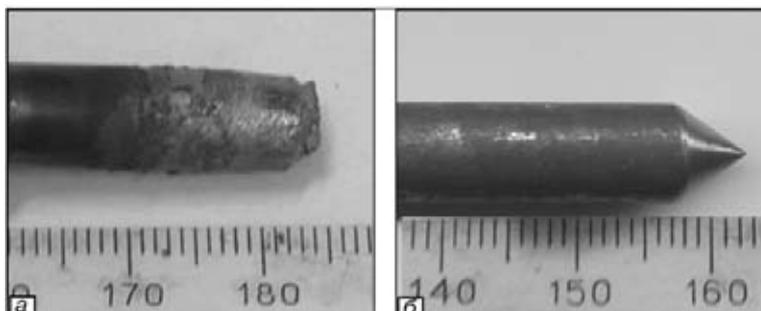


Рис. 3. Вид вольфрамового катода после плавки (а) и восстановления (б)

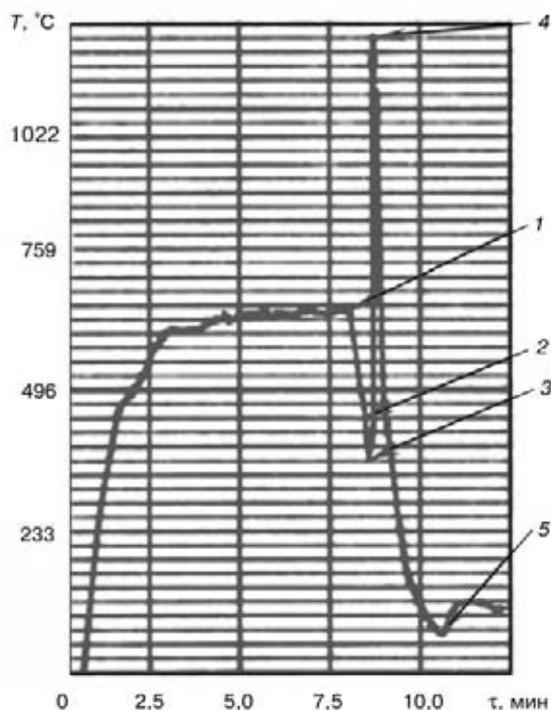


Рис. 4. Изменение температуры сопла в процессе спиннингования расплава: 1 — подвод барабана-холодильника; 2 — установка зазора; 3 — начало слива расплава; 4 — окончание слива и отключение плазмотрона; 5 — отключение и охлаждение тигля; τ — время плавки

которые перемещаются в процессе плавки. Образование шлака на поверхности ванны расплавленного металла возможно вследствие взаимодействия компонентов сплава с остатками кислорода инертной атмосферы плавильной камеры или других химических реакций.

Проведенные эксперименты показали, что в начальный момент плавки (при поджиге плазменной дуги) расплавление металла и распределение температуры в расплаве могут протекать по-разному в зависимости от загрузки шихтовых материалов. Загрузка играет важную роль в защите керамического сливного сопла слоем расплавленного металла от прямого воздействия плазменной дуги. Можно определить следующую оптимальную форму за-



Рис. 5. Металлическая лента, полученная способом спиннингования расплава при плазменно-дуговой гарнисажной плавке

Изменение температуры ($^{\circ}\text{C}$) расплава в зависимости от длины дуги

Номер точки измерения	Длина дуги, мм		
	56	66	76
1	1394	1404	1414
2	863	888	896

рузки: непосредственно под плазмотроном расположены крупные гранулы металла, засыпанные сверху гранулами более мелкой фракции. После поджига дуги верхний слой металла расплавляется, стекает и заполняет днище тигля, здесь он застывает, образуя гарнисажный слой. При оплавлении и осадке металла увеличивается длина дуги и соответственно напряжение между катодом и анодом, а следовательно, изменяется передаваемая мощность плазмотрона. Были получены кривые изменения температуры в зависимости от длины дуги (таблица). Определено, что увеличение длины дуги приводит к повышению напряжения, и, как следствие, к повышению передаваемой мощности плазмотрона. Однако не вся его мощность передается металлу, поскольку при этом увеличиваются потери на нагрев стенок камеры и тигля, а в металле это компенсируется толщиной гарнисажного слоя. Дальнейшее увеличение длины дуги может привести к закипанию воды в каналах водоохлаждения тигля или разрыву дуги. В ходе опыта с изменением длины дуги ток поддерживали на одном уровне (700 А).

Изменение температуры сопла в процессе спиннингования расплава показано на рис. 4. Термопару устанавливали в точке № 4 (см. рис. 1). Как видно из рис. 4, температурное равновесие наступает через 5...6 мин после поджига плазмотрона и выхода на оптимальные технологические режимы. Дальнейшее поддержание этого режима в процессе плавки не имеет смысла, поскольку видимых температурных изменений уже не наблюдается и система достигает температурного равновесия. При выходе на заданный стабильный режим осуществляется подвод к сливному соплу вращающегося барабана-холодильника с заданным зазором между соплом и барабаном. В этот момент перекрывается выброс газа из камеры плавления и подается избыточное давление из ресивера. В короткий промежуток времени происходит охлаждение выступающей части сопла, которое происходит вследствие того, что газовые массы атмосферы увлекаются поверхностью вращающегося барабана. При вращении барабана-холодильника со скоростью 1500...2000 об/мин создается интенсивный обдув сопла, особенно газовым поверхностным слоем барабана-холодильника. В момент спиннингования зазор между срезом сопла и барабаном-холодильником равен 0,1...0,6 мм, что заметно сказывается на общей температуре сопла. На рис. 4 такой резкий спад температуры составляет приблизительно 300...350 $^{\circ}\text{C}$. Вследствие скоротечности процесса слива расплава и низкой теплопроводности керамики это не успевает значительно повлиять на температуру расплава, что создает удовлетворительные условия для протекания процесса



его спиннингования и способствует получению качественной ленты (рис. 5).

Из рис. 2 видно, что верхние слои расплава значительно перегреты по сравнению с нижними. При непрерывном истечении его через щель сливное сопло резко разогревается, что соответствует всплеску температуры с перепадом приблизительно 900 °С. При изменении температуры соответственно меняется и плотность расплава, а также скорость истечения расплава. Уменьшение вязкости расплава приводит к лучшему его растеканию, что улучшает контакт расплава с поверхностью барабана-холодильника. Однако поскольку ширина ленты ограничена шириной щели сливного сопла, то это компенсируется увеличением толщины ленты, вследствие чего она по всей длине имеет разную толщину — от 40 (в начале) до 60 мкм (в конце). После истечения всего объема металла плазматрон отключается. Дальнейший отвод теплоты осуществляется довольно интенсивно, в связи с тем, что большая часть расплава уже слита.

Выводы:

1. При рабочих режимах температура металла около анодного пятна составляет приблизительно 1400 °С, однако на дне ванны, возле щели сливного сопла, она незначительно превышает температуру плавления.

2. Температурное равновесие наступает через 5...6 мин после включения плазматрона или изменения параметров плавки — тока и длины дуги.

3. Для сплава ПРН-88 массой 500 г оптимальная мощность плазматрона составляет 25...30 кВт. Сни-

жение его мощности приводит к затвердеванию расплава около щели сопла из-за чего невозможно осуществление его слива. Превышение указанного диапазона мощности плазматрона приводит к неоправданным затратам электроэнергии, и, как следствие, к сильному перегреву металла и закипанию воды в каналах водоохлаждения тигля.

4. При малых токах дуга подвержена значительному влиянию различных факторов и является нестабильной. Она стабилизируется в случае полного расплавления всей массы металла при токе более 600 А.

1. *Краснов А. Н., Шаривкер С. Ю., Зильберберг В. Г.* Низкотемпературная плазма в металлургии. — М.: Металлургия, 1970. — 216 с.
2. *Температура поверхности металла при плазменной плавке / А. В. Лактионов, А. Я. Стомахин, В. А. Григорян и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1980. — Вып. 3. — С. 90–94.*
3. *Измерение температуры поверхности жидкого титана при плазменно-дуговом переплаве / В. А. Шаповалов, Г. М. Григоренко, В. С. Константинов, А. А. Коваленко // Там же. — 1983. — Вып. 19. — С. 62–68.*
4. *Григоренко Г. М., Соловей Л. Н., Лакомский В. И.* Влияние вольфрама и молибдена на поглощение азота при плазменно-дуговой плавке // Там же. — 1978. — Вып. 9. — С. 89–92.
5. *Латаш Ю. В., Торхов Г. Ф., Козаков С. Н.* Исследование газодинамического давления плазменной дуги на металл при разряде окружающей среды // Там же. — 1984. — Вып. 21. — С. 63–67.
6. *Клюев М. М.* Плазменно-дуговой переплав. — М.: Металлургия, 1980. — 256 с.

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

Поступила 09.11.2004

Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е. О. Патона
Совет научной молодежи ИЭС им. Е. О. Патона

III ВСЕУКРАИНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ «СВАРКА И СМЕЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

25–27 мая 2005 г.

Украина, г. Ворзель, Киевская обл.

Основные направления конференции:

- Прогрессивные технологии сварки и соединения материалов
- Прочность, надежность и долговечность сварных конструкций
- Технологии наплавки, нанесения покрытий и обработки поверхности
- Процессы специальной электрометаллургии
- Новые конструкционные и функциональные материалы
- Техническая диагностика и неразрушающий контроль
- Автоматизация процессов сварки и родственных технологий
- Фундаментальные исследования физико-химических процессов (термодинамика, кинетика, микроструктура, фазовые превращения, электронная структура, свойства)

Адрес оргкомитета:

Украина, 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11
Совет научной молодежи ИЭС им. Е. О. Патона
Тел.: (044) 261 51 34