



УДК 669.187.2:533.9:621.387.143

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ДУГИ ПЛАЗМОТРОНА С ЗАГЛУБЛЕННЫМ КАТОДОМ

В.А. Шаповалов, Д.М. Жиров, В.Р. Бурнашев

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Препятствием на пути к широкому использованию мощных металлургических плазмотронов является малый срок их надежной эксплуатации, способом повышения которого может служить заглубление катода в сопло с целью предотвращения взаимодействия его материала с агрессивной атмосферой печи. Исследована стабильность работы экспериментального образца металлургического плазмотрона при варьировании заглубления графитированного катода в сопло и расхода плазмообразующего газа (аргона). При заглублении графитированного катода в сопло на расстояние менее 0,65 диаметра его эрозия составляет $2 \cdot 10^{-5}$ г/Кл, что соответствует известным данным об уровне эрозии. Плазменная дуга не имеет четкой точки привязки и перемещается по внешнему периметру торца катода. При заглублении графитированного катода в сопло на расстояние 0,65 диаметра его эрозия составляет $1,5 \cdot 10^{-6}$ г/Кл, т. е. уменьшается на порядок. Дуга привязана к осевому отверстию катода. Меньшую эрозию можно объяснить защитой катода от взаимодействия с атмосферой печи, а также рассредоточением пятна дуги по периметру внутреннего отверстия. При заглублении графитированного катода в сопло на расстояние более 0,65 диаметра и расходе плазмообразующего газа 200...280 л/мин и меньше возникает двойное дугообразование, что недопустимо при эксплуатации плазмотрона. Таким образом, с точки зрения эрозии катода и стабильности горения дуги оптимальным заглублением катода в сопло является примерно 0,65 его диаметра. При расходе плазмообразующего газа 330, 200 и 150 л/мин градиент напряжения дуги в полости сопла плазмотрона составляет соответственно 1,25, 2,0 и 4,0 В/мм. Библиогр. 8, табл. 1, ил. 3.

Ключевые слова: плазмотрон; сопло; ресурс работы; графитированный катод; расход плазмообразующего газа; заглубление катода; эрозия катода; двойное дугообразование

Одним из путей повышения качества стали является ее обработка в ковшах-печах и регулирование температуры в промежуточных ковшах машины непрерывного литья заготовок.

Плазменные ковши-печи, по сравнению с электродуговыми, имеют следующие преимущества: улучшенные термодинамические и кинетические условия проведения металлургических реакций раскисления и рафинирования металла от газов и неметаллических включений, высокая эффективность превращения электрической энергии в тепловую, повышенная стабильность, управляемость и чистота плазменного разряда, герметичность рабочего пространства, контролируемость атмосферы и широкий диапазон давления технологических газов. Плазменные ковши-печи позволяют уменьшить загрязнение неметаллическими включениями, что особенно важно при производстве тонкого листового проката. Плазменные источники нагрева, по сравнению

с электродуговыми, дают возможность точнее и быстрее регулировать температуру расплава [1].

Одним из главных технологических факторов, позволяющих обеспечить получение непрерывнолитых слитков высокого качества, является температура жидкой стали. При недостаточном перегреве над температурой кристаллизации снижается текучесть стали и осложняется ее разливка, а значительный перегрев ведет к образованию внутренних трещин и увеличивает осевую пористость слитка. Также следует учитывать, что с повышением перегрева жидкого металла увеличивается размер зерна в слитке, что, как правило, нежелательно.

Производство качественной стали с низким содержанием неметаллических включений при непрерывной разливке зависит от эффективности контроля и точности регулирования температуры металла в промежуточном ковше. В нем температура стали резко изменяется в начале (за счет поглощения теплоты футеровкой ковша) и в конце разливки (из-за естественного охлаждения). При отсутствии нагрева ковша для компенсации охлаждения приходится повышать температуру на выпуске стали



из печи. Для обеспечения стабильности процесса разливки температура металла в кристаллизаторе должна на 15... 20 °С превышать температуру ликвидуса, однако по условиям качества слитка перегрев не должен превышать 30 °С. Поэтому сейчас проводятся разработки по применению нагрева, в частности плазменного, в промежуточных ковшах [2–5].

Несмотря на интенсивные разработки плазменной техники, наличие разнообразных принципиальных схем и конструкций широкому использованию мощных металлургических плазмотронов препятствует малый срок их надежной эксплуатации [6]. Выход из строя электродного узла во время металлургического процесса считается аварийной ситуацией. К тому же процесс замены электрода является довольно продолжительным, а при использовании вольфрамового электрода — еще и дорогостоящим.

На ресурс работы плазмотрона влияют многие факторы, особенно плотность тока на электроде (допустимая зависит от материала, из которого он изготовлен), эффективность охлаждения сопла и электрода, взаимодействие материала электрода с атмосферой и переплавляемым металлом через газовую фазу и прямое набрызгивание [7].

Для предупреждения взаимодействия материала катода с атмосферой печи и с металлом на основе плазмотрона ПД 147 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона разработан и изготовлен экспериментальный образец металлургического плазмотрона. Заглубление в сопло полого графитированного катода внешним диаметром 50 мм и диаметром отверстия 12 мм определяется его длиной и может достигать 90 мм. Плазмообразующий газ (аргон) через завихритель подается между катодом и соплом.

Для проведения исследований на стенде ОБ1501 плазмотрон смонтировали под углом наклона к поверхности тигля около 45°. Расстояние между нижним краем сопла и металлом в тигле составляло примерно 20 мм. Расположение плазмотрона под углом к поверхности тигля позволило проводить наблюдение, фото- и видеofиксацию формы плазменной дуги и точек ее привязки. Стенд ОБ1501

Параметры испытаний плазмотрона с заглубленным графитированным катодом

Заглубление катода, мм	Расход аргона, л/мин	Падение напряжения на дуге, В	Примечание
5	330	40	Стабильное горение дуги при уменьшении расхода аргона
	200	40	
	150	40	Эрозия катода $2 \cdot 10^{-5}$ г/Кл
	100	40	
13	330	40	Колебание дуги при расходе аргона 150 л/мин Эрозия катода $2 \cdot 10^{-5}$ г/Кл
	200	40	
	150	75	
20	330	50	Колебание дуги при расходе аргона 200 л/мин Эрозия катода $2 \cdot 10^{-5}$ г/Кл
	200	75	
	150	100	
32	330	75	Стабильное горение дуги при уменьшении расхода аргона
	200	75	
	150	80	Эрозия катода $1,5 \cdot 10^{-6}$ г/Кл
	100	85	
40	330	80	Двойное дугообразование при расходе аргона 230 л/мин
	230	100	
55	330	80	То же, при расходе аргона 200 л/мин
	200	75	
63	330	75	То же, при расходе аргона 280 л/мин
	280	75	

имеет герметичную камеру и оборудован вакуумной системой.

Перед началом эксперимента графитированный катод определенной длины, зависящей от необходимого заглубления в сопло, закручивали в электрододержатель. Камеру герметизировали, создавали разрежение до давления $1 \cdot 10^{-2}$ кПа и заполняли аргоном до атмосферного давления. После этого

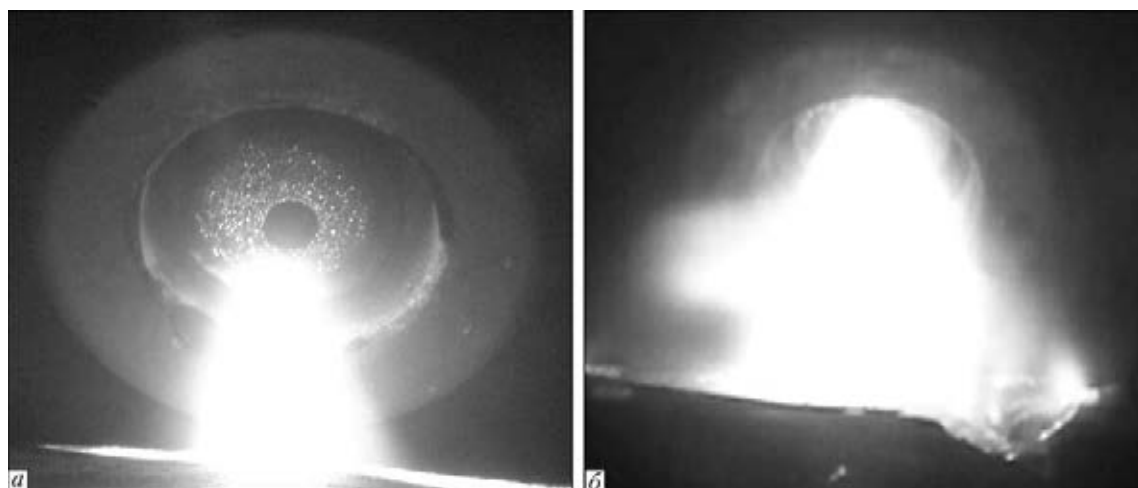


Рис. 1. Плазменная дуга при заглублении графитированного катода в сопло 5 (а) и 32 мм (б)

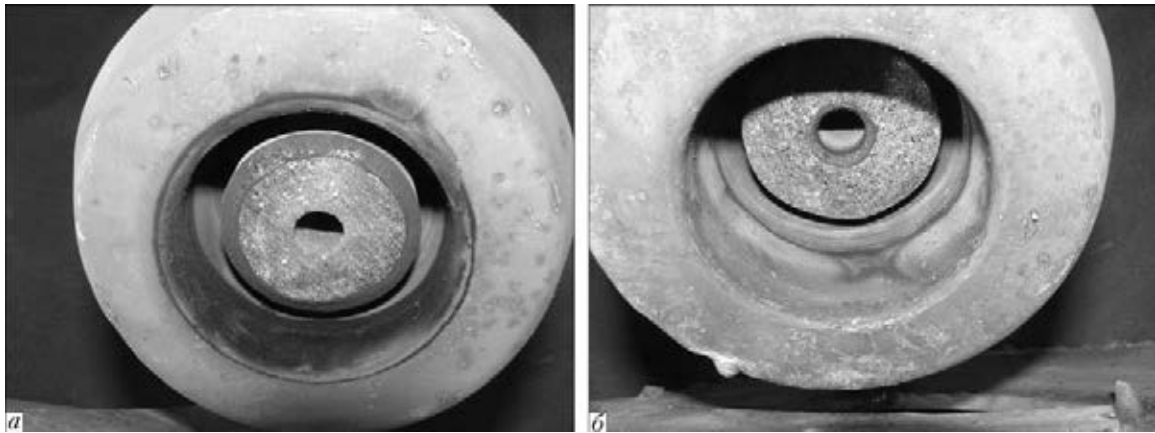


Рис. 2. Характер эрозии графитированного катода при его заглаблении в сопло 5 (а) и 32 мм (б)

включали водяное охлаждение камеры, тигля и плазмотрона, подавали плазмообразующий газ с расходом 330 л/мин и открывали сброс для избыточного газа из камеры.

Во время экспериментов регулировали ток дуги, расход плазмообразующего газа и фиксировали падение напряжения на дуге.

Эрозию графитированных катодов при известных значениях тока и времени работы определяли путем взвешивания до и после эксперимента на лабораторных весах ВЛТК-500 с погрешностью $\pm 0,08$ г.

Одним из главных условий, определяющих надежность работы плазмотрона, является отсутствие двойного дугообразования — дуга горит не с катода на переплавляемый металл, а с катода на сопло и только оттуда на металл. Такое явление приводит к быстрому прогару сопла, что является аварийной ситуацией.

Проведена серия экспериментов, в которых при фиксированном заглаблении катода в сопло и токе 1000 А уменьшали расход плазмообразующего газа

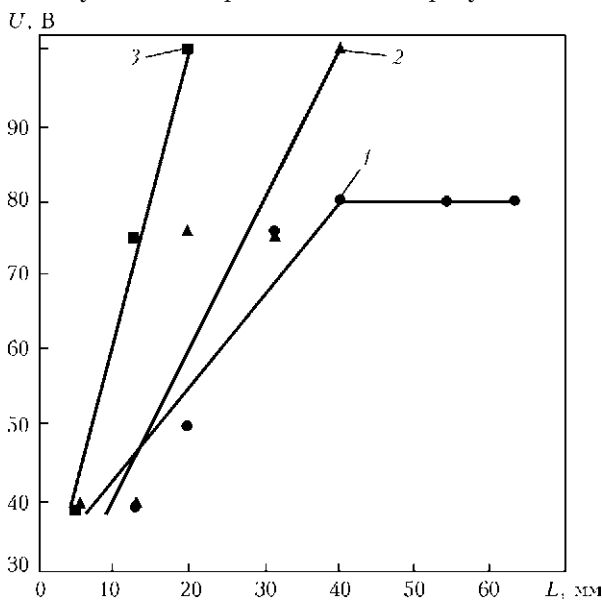


Рис. 3. Зависимость падения напряжения на плазменной дуге от заглаблении графитированного катода в сопло L при значении тока 1000 А и следующем расходе плазмообразующего газа, л/мин: 1 — 330; 2 — 200; 3 — 150

от 330 л/мин до значений, при которых происходило нарушение стабильности работы экспериментального образца плазмотрона, в частности возникло двойное дугообразование (таблица).

При заглаблении графитированного катода 5 мм с уменьшением расхода плазмообразующего газа до минимального значения 35 л/мин характер горения дуги не изменялся. Дуга горела преимущественно из нижней периферийной части катода (рис. 1, а). Под воздействием закрученного плазмообразующего газа дуга иногда осуществляла обороты по периметру катода. При этом падение напряжения на дуге увеличивалось от 40 до 140 В. Эрозия графитированного катода (рис. 2, а) проходила по его периметру и составляет около $2 \cdot 10^{-5}$ г/Кл, что соответствует уровню эрозии графитированных катодов плазмотронов в промышленности [8].

В случае заглаблении катода в сопло 13 и 20 мм при расходе аргона 330 л/мин характер поведения дуги и эрозии катода существенно не отличался от предыдущего эксперимента. С уменьшением расхода плазмообразующего газа дуга становилась менее обжатой, т. е. увеличивался ее диаметр и уменьшалась яркость, что сопровождалось увеличением падения напряжения на дуге соответственно до 75 и 100 В. По сравнению с заглаблением 5 мм, зафиксировано колебание дуги, однако двойного дугообразования не возникало.

При заглаблении графитированного катода в сопло 32 мм, т. е. 0,65 диаметра, отмечена качественно другая картина. Дуга привязана к осевому отверстию катода (рис. 1, б), что можно объяснить отжатием дуги от стенок к центру сопла потоком аргона, поступающим в полость через зазор между катодом и соплом. Уменьшение расхода плазмообразующего газа от 330 до 100 л/мин вызывало увеличение падения напряжения на дуге от 75 до 85 В, однако стабильность горения дуги не нарушалась.

Эрозия графитированного катода (рис. 2, б) происходила по периметру внутреннего отверстия и равнялась около $1,5 \cdot 10^{-6}$ г/Кл, т. е. была на порядок меньшей, чем у графитированных катодов плазмотронов в промышленности [8]. Меньшую эрозию можно объяснить защитой катода от взаимодействия с атмосферой печи, а также рассредо-



точением пятна дуги по периметру внутреннего отверстия.

Последующее заглубление катода (40, 55 и 63 мм) приводило к ухудшению стабильности плазменной дуги, она время от времени перемещалась по поверхности катода. Падение напряжения на дуге при этом составляло около 80 В. Уменьшение расхода плазмообразующего газа до 200...280 л/мин вызывало двойное дугообразование, что недопустимо при эксплуатации плазматрона. При заглублении катода в сопло 70 мм возбуждения плазменной дуги не произошло.

Для определения градиента напряжения дуги в полости сопла плазматрона построены зависимости падения напряжения на дуге от заглубления катода в сопло (рис. 3). Приэлектродное падение напряжения и падение напряжения на участке сопло-металл составляют около 35 В. При расходе плазмообразующего газа 330, 200 и 150 л/мин градиент напряжения дуги в полости сопла плазматрона достигает соответственно 1,25, 2,0 и 4,0 В/мм.

Следует обратить внимание, что при расходе плазмообразующего газа 330 л/мин в случае увеличения заглубления катода в сопло более 40 мм (0,8 диаметра) увеличения падения напряжения не происходит. Достоверного объяснения этого явления нами пока не найдено. Оно может быть вызвано частичным протеканием тока по металлу сопла, поскольку при расходе аргона 200...280 л/мин при таких заглублениях возникает двойное дугообразование.

Выводы

1. Исследования стабильности работы экспериментального образца плазматрона при варьировании заглубления графитированного катода в сопло и расхода плазмообразующего газа позволяют рекомендовать как оптимальное заглубление катода на 0,65 его диаметра с точки зрения эрозии ($1,5 \cdot 10^{-6}$ г/Кл), расхода плазмообразующего газа и отсутствия двойного дугообразования. При меньшем заглублении отмечена интенсивная эрозия катода ($2 \cdot 10^{-5}$ г/Кл), а при большем — двойное дугообразование.

2. Определено, что при расходе плазмообразующего газа 330, 200 и 150 л/мин градиент напряжения дуги в полости сопла плазматрона составляет соответственно 1,25, 2,0 и 4,0 В/мм.

1. *Некоторые* возможности обработки стали в дуговых и плазменных ковшах-печах // Г.А. Мельник, О.С. Забарин, М.Л. Жадкевич и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 1. — С. 26–31.
2. *Nippon Steel type tundish plasma heater «NS-Plasma I» for continuous caster* // S. Kittaka, S. Wakida, T. Kanki, T. Hosokawa // Nippon Steel Techn. Rept. — 2002. — № 85. — P. 162–166.
3. *Bebber H., Kranz A. A plasma tundish heater* // Steel Research. — 2001. — № 11/12. — P. 460–465.
4. *Синкевич О.А., Смирнов Е.П.* Использование дуговых плазматронов для обеспечения температуры жидкой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ // Сталь. — 2008. — № 10. — С. 64–68.
5. *Моделирование режимов плазменного подогрева стали в промежуточном ковше на экспериментальной установке* // Э.Х. Исакаев, В.А. Катаржис, В.К. Королев, А.А. Леонов // Черная металлургия. — 2008. — № 10. — С. 19–23.
6. *Электродуговые генераторы термической плазмы* // М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин, А.Н. Тимошевский и др. — Новосибирск: Наука, 1999. — 712 с.
7. *Шаповалов В.А., Латаш Ю.В.* Металлургические плазматроны // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1999. — № 4. — С. 50–56.
8. *Нойшютц Д., Беббер Х.Й.* Промышленное применение плазменной техники в черной металлургии // Черные металлы. — 1993. — Май. — С. 15–25.

The barrier on the way to the wide application of powerful metallurgical plasmatrons is a small period of their reliable service. The method of its increasing can be a deepening of cathode into nozzle to prevent the interaction of its material with the furnace aggressive atmosphere. Stability of operation of experimental sample of metallurgical plasmatron by varying the deepening of a graphite cathode into the nozzle and consumption of plasma-forming gas (argon) was investigated. At graphite cathode deepening into nozzle for the distance of less than 0.65 of diameter, its erosion amounts to $2 \cdot 10^{-5}$, that corresponds to known data about the level of erosion. Plasma arc has no a clear point of fixing and moved around the external perimeter of the cathode end. At graphite cathode deepening into nozzle for the distance of 0.65 of diameter, its erosion amounts to $1.5 \cdot 10^{-6}$, i.e. it is decreased by an order. The arc is fixed to the nozzle axial hole. The smaller erosion can be explained by the cathode protection from interaction with the furnace atmosphere, and also by spreading the arc spot around the perimeter of inner hole. At graphite cathode deepening into nozzle for the distance of more than 0.65 of diameter, and consumption of plasma-forming gas of 280...280 l/min and less, a double arcing is occurred that is inadmissible in plasmatron service. Thus, from the point of view of cathode erosion and stability of arc burning the optimum deepening of cathode into nozzle is approximately 0.65 of its diameter. At consumption of plasma-forming gas of 330, 200 and 150 l/min the gradient of arc voltage in the plasmatron nozzle cavity is, respectively, 1.25, 2.0 and 4.0 V/mm. Ref.6, Table 1, Figs. 3.

Key words: *plasmatron; nozzle; service life; graphite cathode; consumption of plasma-forming gas; deepening of cathode; erosion of cathode; double arcing*

Поступила 22.01.2013