

04;15

Мегаваттный генератор низкотемпературной плазмы постоянного тока с расширяющимися каналами газоразрядного тракта

© М.Х. Гаджиев, Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, Д.И. Юсупов,
М.А. Саргсян

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
E-mail: makhach@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 декабря 2016 г.

Разработан и исследован эффективный мегаваттный двухузловой генератор низкотемпературной плазмы аргона, состоящий из катодного и анодного узлов с расширяющимися каналами газоразрядных трактов и относящийся к классу плазмотронов постоянного тока, с КПД $\approx 80-85\%$ и высоким ресурсом работы при силе тока до 4000 А.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.08.44529.16592

Генераторы низкотемпературной плазмы (ГНП) находят все более широкое применение в промышленности, плазмохимии, плазменной технологии обработки материалов и нанесения покрытий, в уничтожении токсичных отходов и синтезе наноматериалов, а также в исследованиях сублимации тепловой защиты.

В последние годы большой интерес представляют для науки и техники ГНП большой мощности для исследования электрофизических и электрохимических свойств газов применительно, например, к металлургии для поддержания температуры в промежуточном ковше [1]. Часть тепла от жидкого металла в процессе разлива теряется излучением, теплоотводом в футеровку и конвекцией. Из-за этого перегревают металл в разливочном ковше, что в целом повышает затраты и снижает производительность процесса. В настоящее время используют химический подогрев или электромагнитное воздействие. Однако химический подогрев приводит к изменению химического состава стали и, следовательно, к ухудшению качества, а электромагнитное

перемешивание с подогревом — дорогостоящий процесс (15 kW·h на 1 тонну стали). В различных странах подогрев пытаются производить плазменными методами [2–6].

В связи с этим основной целью работы является разработка эффективного мегаваттного высокоресурсного ГНП для, например, подогрева металла в промежуточном ковше и исследование параметров получаемого на выходе плазменного потока.

Литературный анализ созданных генераторов плазмы самых разных конструкций [2,3,7,8], работающих при мощностях от нескольких kW до десятков MW, показывает, что наиболее устойчивый режим работы и максимальный ресурс имеют ГНП при использовании в качестве плазмообразующего газа аргона, а наибольший тепловой КПД достигается в электродуговых плазмотронах постоянного тока.

На практике в промежуточном ковше (ПК) обычно используется схема плазменного подогрева с подовым анодом. Недостатками данной схемы являются необходимость проектирования сложных быстроразъемных сильноточных анодных разъемов, системы охлаждения подового анода и выполнение в днище промежуточного ковша дополнительных отверстий для подовых анодов, что повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций на разливочной площадке. Поэтому было решено создать ГНП, состоящий из двух разнесенных в пространстве подключенных последовательно узлов — катодного и анодного (рис. 1), расположенных вертикально над расплавом, где электрическая цепь замыкается между катодом и анодом через расплав. Расплав в данной схеме выступает в качестве вспомогательного электрода. При такой конструкции ГНП электрический ток проходит через расплав практически по всей длине ПК от одного узла плазмотрона к другому, что повышает эффективность тепловложения.

За основу созданного мегаваттного ГНП были взяты разработки и исследования плазмотронов постоянного тока с расширяющимся каналом выходного электрода различной мощности, преимущества которых перед плазмотронами с каналом постоянного сечения заключаются в увеличении КПД, повышении стабильности и ресурса работы устройства [9,10].

Подогрев расплава в ПК происходит в основном из-за излучения плазмы, которое зависит от вкладываемой мощности. Увеличения мощности желательно добиваться за счет повышения напряжения дуги, так как сильное повышение тока сказывается на снижении ресурса

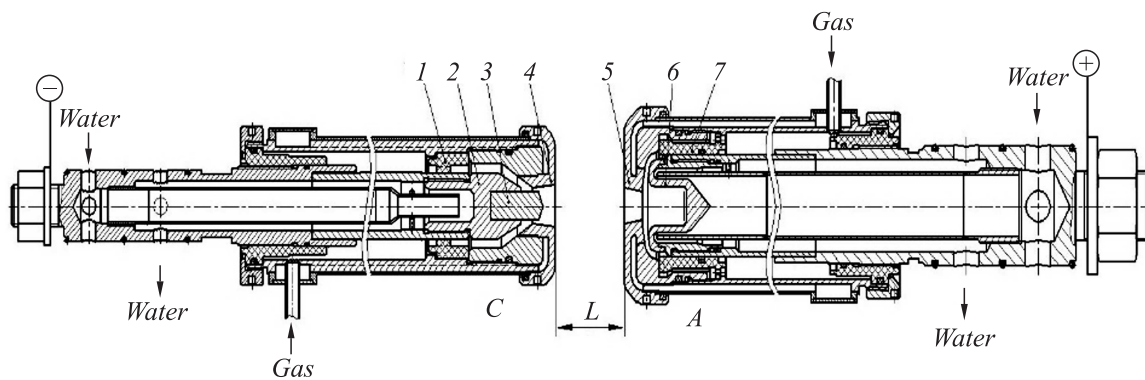


Рис. 1. Схема экспериментального плазмотрона: 1 — изолятор с продольными газовыми каналами, 2 — катод, 3 — вольфрамовая вставка, 4 — сопло катодного узла, 5 — сопло анодного узла, 6 — анод, 7 — изолятор со специальной формой газовых каналов.

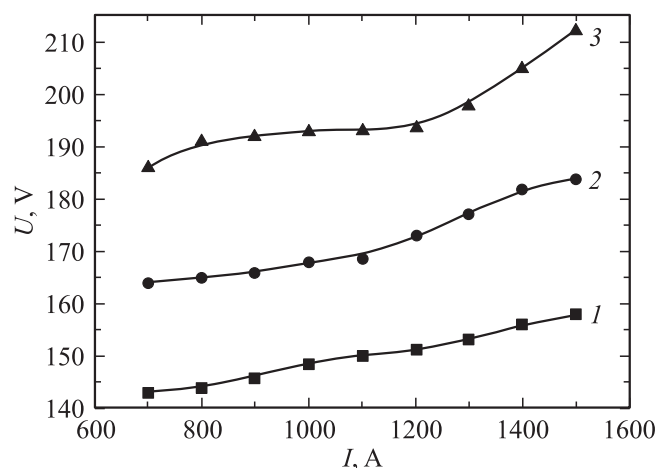


Рис. 2. ВАХ плазмотрона для расхода плазмообразующего газа 2 g/s на катоде и 3.5 g/s на аноде при длине дуги: 1 — 160, 2 — 200, 3 — 240 mm.

электродов. Повышения мощности можно добиться за счет подбора конфигурации электродов, оптимального угла раскрытия, длины и внутреннего диаметра канала сопла. Правильный подбор параметров ГНП позволяет получить возрастающую вольт-амперную характеристику (ВАХ), которая обеспечит устойчивый режим горения дуги в широком диапазоне изменения параметров (сила тока, расход плазмообразующего газа), а также увеличение теплового коэффициента полезного действия (КПД) при увеличении тока.

При исследовании электрофизических характеристик ГНП, параметров плазмы и оптимизации конструкции катодного и анодного узлов их располагали друг против друга (рис. 1). Поджиг основной дуги производился с помощью вспомогательного угольного электрода (имитатора расплава), кратковременно размещаемого между узлами. При поджиге ГНП вспомогательная дуга между катодом, угольным электродом и анодом инициировалась посредством осцилляторов между вольфрамовой вставкой катода 3 и соплом 4 и между анодом 6 и соплом 5. После зажигания дуги вспомогательный угольный электрод удалялся.

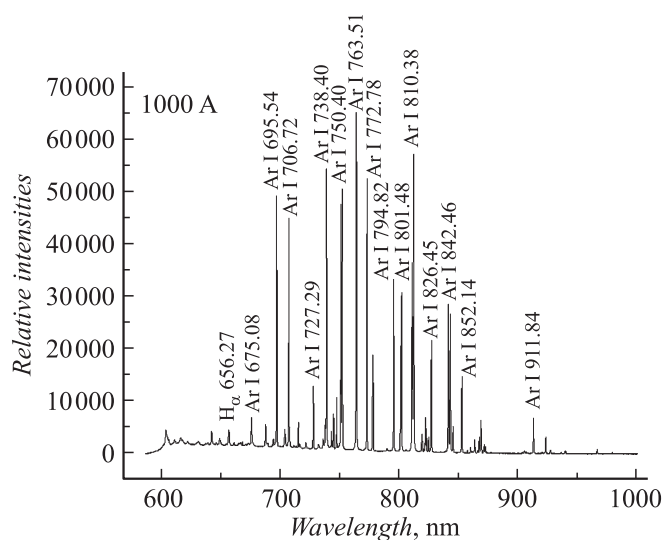


Рис. 3. Характерные спектры излучения плазмы аргона (ток дуги 1000 А).

Выбор оптимальной конфигурации узлов ГНП позволил получить возрастающую ВАХ (рис. 2): длина сопла 4 катода ~ 16 мм с углом раскрытия $\sim 12^\circ$, длина сопла 5 анода ~ 13 мм с углом раскрытия $\sim 20^\circ$. Отличительной особенностью конструкции анодного узла является оригинальная форма медного анода 6 и специальная форма тангенциально расположенных газовых каналов в изоляторе 7, что позволяет непрерывно вращать анодное пятно по внутренней поверхности анода 6 и тем самым уменьшить концентрацию тепловых потоков.

Экспериментальные исследования возможности увеличения теплового КПД за счет увеличения расхода плазмообразующего аргона показали, что при увеличении расхода аргона в 3 раза напряжение дуги возрастает всего на 30%, поэтому пытаться увеличивать мощность дуги только этим способом неперспективно. При расходе газа 6 г/с и более в каждом узле ГНП нарастание напряжения дуги становится слабым, при этом на катоде напряжение устанавливается на уровне ~ 110 В, на аноде ~ 160 В, т.е. общее падение напряжения в ГНП составляет ~ 270 В.

Температура и концентрация электронов в приосевой области плазмы аргона при различных значениях силы тока

I, A	T_e, K	n_e, cm^{-3}
700	10500	$6.9 \cdot 10^{16}$
800	12300	$7.1 \cdot 10^{16}$
900	13300	$7.27 \cdot 10^{16}$
1000	16000	$7.99 \cdot 10^{16}$
1100	16300	$7.6 \cdot 10^{16}$
1200	16400	$8.3 \cdot 10^{16}$
1300	16500	$8.4 \cdot 10^{16}$
1400	16600	$8.7 \cdot 10^{16}$
1500	17000	$9.0 \cdot 10^{16}$

Оценка КПД плазмотрона проводилась калориметрическим методом: измерением расходов и температуры воды на входах и выходах автономно охлаждаемых частей узлов плазмотрона. По этим результатам испытаний КПД устройства достигает 80–85%.

Анализ параметров плазмы проводился спектральными методами с использованием трехканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec 2048, где изображение дуги проецировалось кварцевой линзой с фокусным расстоянием 240 mm на входное отверстие световода спектрометра со спектральным разрешением 0.2–0.5 nm и диапазоном 200–1000 nm. Спектры снимались с центральной зоны свечения на стыке двух плазменных потоков. Пример полученных спектров приведен на рис. 3. Концентрация электронов n_e измерялась по штарковскому уширению спектральных линий H_α 656 nm и Ar I 675 nm, которая позже сравнивалась с уширением линий из работ Конжевика [11]. В приосевой области плазмы аргона концентрация электронов при изменении тока в диапазоне 700–1500 A меняется незначительно: $7\text{--}9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (см. таблицу). Температура электронов T_e считалась методом относительных интенсивностей линий одного типа (атомов) [12] и приведена в таблице.

Плазмотрон прошел успешное испытание при подогреве стали в ПК на ОАО „Магнитогорский металлургический комбинат“ и подтвердил эффективность плазменного подогрева металла для повышения его

качества [13]. При испытаниях было определено, что повышенный ресурс ГНП обеспечивается при расходе аргона до 20 g/s, силе тока до 4000 А и напряжении до 300 V (длина открытой части дуги 150 mm).

Разработана оригинальная двухузловая конструкция мегаваттного генератора низкотемпературной плазмы аргона, включающая катод, полый анод и сопла с расширяющимся каналом, которые стабилизируют горение дуги, обеспечивают повышенный ресурс ГНП и позволяют получить высокоэнтальпийный плазменный поток со среднемассовой температурой 10 000–17 000 К и концентрацией электронов в приосевой области плазмы до $9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ при токе дуги 700–1500 А для расхода плазмообразующего газа 2 g/s на катоде и 3.5 g/s на аноде.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 14-50-00124).

Список литературы

- [1] 60 лет непрерывной разливки стали в России: Сб. статей / Под ред. С.В. Колпакова и Е.Х. Шахпазова. М.: Интерконтакт Наука, 2007. 512 с.
- [2] *Troniman J., Comacho D.* // *Iron Steel Engin.* 1995. V. 73. N 11. P. 39–44.
- [3] *Chapellier P., Jacquot J., Sosin L.* // *Proc. 3rd Europ. Conf. Continuous Casting.* 1998. P. 583–591.
- [4] *Newschutz D., Stadler P., Bebbler H.* // *Steel Res.* 1996. V. 67. N 11. P. 575–578.
- [5] Система плазменного подогрева NS-Plasma I фирмы Nippon Steel для промежуточного ковша УНРС // *Новости черной металлургии за рубежом.* 2002. № 4. С. 49–53.
- [6] Плазменный подогрев стали в промежуточном ковше // *Новости черной металлургии за рубежом.* 2002. № 3. С. 53–59.
- [7] *Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С.* Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993. 296 с.
- [8] *Глебов И.А., Рутберг Ф.Г.* Мощные генераторы плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 264 с.
- [9] *Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Гаджиев М.Х.* // *ФХОМ.* 2016. С. 1–4.
- [10] *Гаджиев М.Х., Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Юсупов Д.И.* // *Письма в ЖТФ.* 2016. Т. 42. В. 2. С. 44–49.
- [11] *Konjevic N., Lesage A., Fuhr J.R. and W.L.* // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 2002. V. 31. N 3. P. 819.
- [12] *Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгрёвена.* М.: Мир, 1971. 552 с.
- [13] *Филиппов Г.А., Тюфтяев А.С., Гаджиев М.Х., Юсупов Д.И.* // *Металлург.* 2016. № 3. С. 49–53.