Д. т. н. **И. Н. Кравченко**[1,2] (✉), к. т. н. **С. В. Карцев**[2], д. т. н. **Ю. А. Кузнецов**[3]

[1] *ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева», Москва, Россия*

[2] *ФГБУН «Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), Москва, Россия*

[3] *ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина», г. Орел, Россия*

УДК 621.793.74:624.436]:533.9.07

ПРИМЕНЕНИЕ ГОРЯЧИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ПРИ НАНЕСЕНИИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Приведены результаты комплексных исследований в области применения отработавших газов двигателя внутреннего сгорания (ДВС) как источника горячих углеводородов вместо пропан-бутана или природного газа для уменьшения окислительных процессов. Показано, что введение горячих углеводородов из отработавших газов дизельного двигателя существенно снижает окислительно-восстановительный потенциал плазменной струи плазмотрона по отношению к распыляемому материалу. Разработана экспериментальная мобильная многофункциональная плазменная установка, позволяющая выполнять воздушно-плазменное напыление и оплавление нанесенных износостойких покрытий. При этом в качестве плазмообразующего газа используют отработавшие газы ДВС.

Ключевые слова: *горячие углеводороды, двигатель внутреннего сгорания (ДВС), плазменная установка, плазмотрон, ресурсосберегающие технологии, плазменное напыление покрытий.*

ВВЕДЕНИЕ

В жесткой конкурентной борьбе, в которой вынуждены сегодня работать российские производители, большое значение имеет применение современных высокоэффективных ресурсосберегающих технологий. К ним можно отнести плазменные методы нанесения покрытий [1–8]. Современные плазменные технологии позволяют получать высококачественные металлы и сплавы, выращивать монокристаллы, производить резку и наплавку металлов, наносить износостойкие покрытия, улучшающие свойства металла [9–13].

Для этих целей используют плазменные генераторы, т. е. электрические газоразрядные устройства для получения плазмы, называемые плазмотронами [14–21]. Плазмотроны предназначены для получения низкотемпературной плазмы (10^4 К). К ним можно отнести плазмотрон мобильной многофункциональной плазменной установки [22–24]. Мощность такого плазмотрона составляет около 80 кВт, в качестве плазмообразующего газа используется смесь сжатого воздуха класса 12 (ГОСТ 17433) с пропан-бутаном, а в качестве транспортирующего газа — сжатый воздух. В зависимости от того, какой плазмообразующий газ подается, плазмотрон может создавать нейтральную, восстановительную или окислительную среду. В нашем случае в качестве плазмообразующего газа использовали сжатый воздух. Понятно, что чистый воздух будет создавать в плазмотроне сильную окислительную среду, которая может окислять практически все металлы, за исключением благородных, и создавать неблагоприятные условия при нанесении различных покрытий. Поэтому при работе мобильной многофункциональной плазменной установки на сжатом воздухе для нанесения износостойких покрытий применяют в основном самофлюсующиеся сплавы на основе никеля, что резко сужает области ее применения.

Для устранения этих недостатков проведены исследования, цель которых заключается в обосновании применения горячих углеводородов от двигателя внутреннего сгорания (ДВС) вместо пропан-бутана или природного газа при работе мобильной многофункциональной плазменной установки и в разработке способа защиты плазменной наплавки газопорошковым потоком.

✉

И. Н. Кравченко
E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поставленная цель достигалась решением задачи, заключающейся в использовании горячих углеводородов от ДВС как газа, одновременно как транспортирующего порошок, так и защитного, отказавшись от применения отдельного защитного сопла. Для эффективной защиты расплавленного металла газопорошковой смесью изготовлен плазмотрон [25], через сопло которого в зону наплавки подавался транспортирующим газом порошок. В процессе работы плазмотрона исследовали параметры износа катодов плазмотрона при использовании в качестве плазмо-образующего газа сжатого атмосферного воздуха, а также смеси сжатого атмосферного воздуха и горячих углеводородов от ДВС [26, 27].

Для исследования электродов применяли мобильную многофункциональную плазменную установку (рис. 1) с плазмотроном ПУН-1УХЛ4 [23]. Силу тока дуги плазмотрона в процессе проведения эксперимента изменяли от 170 до 220 А. Давление плазмообразующего газа на входе в вихревую камеру плазмотрона находилось в пределах $3 \cdot 10^5$–$4 \cdot 10^5$ Н/м^2 с расходом $2{,}5 \cdot 10^{-3}$–$3{,}5 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Расход охлаждающей жидкости (тосол марки А40) для электрода 0,10–0,20 кг/с. Количество включений для каждого образца было разным, продолжительность включений изменялась от 0,5 до 120 мин.

Рис. 1. Мобильная многофункциональная плазменная установка [24]

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ОТ ДВС В СОСТАВЕ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Плазмотрон многофункциональной плазменной установки для плазменного нанесения покрытий создает низкотемпературную плазму. В упрощенном представлении это означает, что практически все молекулы раскалываются на ионы, которые представлены химическими формулами:

$$N_2 \rightleftarrows N' + N', \quad (1)$$

$$O_2 \rightleftarrows O' + O', \quad (2)$$

$$H_2O \rightleftarrows OH' + H'. \quad (3)$$

Сложные углеводороды парафинового ряда, имеющие при нормальных условиях нейтральную реакцию, раскалываются на радикалы, обладающие восстановительными свойствами, т. е. оба радикала стремятся присоединить к себе по атому кислорода. Таким образом, если плазмообразующий газ — сжатый воздух, то на выходе образуется смесь атомов N, O, H и OH. Из этой смеси в транспортирующей части получаем следующие вещества: N_2, NO, O_2, O_3, H_2O, H_2O_2 и CH. Диоксид азота при таких условиях не может образовываться, ему нужна температура ниже 200 °С. При введении в плазмообразующую смесь в стехиометрическом отношении пропан-бутана или природного газа (95 % метана) на выходе будем иметь следующие вещества: N_2, NO, CO_2 и H_2O, т. е. нейтральную среду. Если в смеси будет избыток углеводородов, то на выходе получим N_2, NO, CO_2, H_2O и радикалы CH_3 и C_2H_5, которые будут стремиться отобрать кислород из оксида азота.

В плазмотроне соотношение воздуха и углеводородов определяется коэффициентом α, величина которого указывает на полученную среду: при α = 1 среда нейтральная (стехиометрический состав), при α > 1 среда окислительная, при α < 1 среда восстановительная. При работе на сжатом воздухе с пропан-бутаном коэффициент α определяется по эмпирической формуле

$$\alpha = 0{,}037 \frac{Q_в}{Q_{пб}}, \quad (4)$$

где $Q_в$ — количество воздуха, поступающего в смеситель перед плазмотроном, м^3/ч; $Q_{пб}$ — количество пропан-бутана, поступающего в смеситель перед плазмотроном, м^3/ч.

Нетрудно подсчитать, что при расходе воздуха 5 м^3/ч требуется 0,185 м^3/ч пропан-бутана. При количестве пропан-бутана менее 0,185 м^3/ч среда будет окислительная, более 0,185 м^3/ч — восстановительная. Формулу (4) необходимо уточнить. При работе на чистом сжатом воздухе без пропан-бутана в формуле (4) знаменатель дроби превращается в ноль, тогда α равен бесконечности. При этом надо полагать, что равенство α бесконечности предполагает и бесконечную кислотность среды, что неверно. Кислотность будет велика, но все же будет иметь конечное значение.

Работа плазмотрона предполагает наличие компрессора для получения сжатого воздуха. В стационарных условиях это не представляет труда, однако в полевых условиях создает дополнительные сложности. В то же время в полевых условиях всегда можно воспользоваться ДВС базового автомобиля многофункциональной плазменной установки. Горячие углеводороды ДВС могут вы-

ходить под давлением до 0,2 МПа. Излишние газы могут выходить через регулируемый дроссель выпускной системы двигателя в атмосферу.

Рассмотрим состав горячих углеводородов дизельного ДВС и проанализируем, каким образом в этом случае следует подкорректировать формулу (4), определяющую кислотность среды. Для корректировки использовали дизельный двигатель КамАЗ-740, который работает на холостых оборотах примерно 800 мин$^{-1}$. В этом случае состав отработавших газов будет не таким, как при нормальной загрузке двигателя. Из заданных пределов концентрации составляющих будем брать только нижние значения, следовательно: азот 78 %, кислород 17 %, водяной пар 1,7 %, CO_2 3 %, CH 0,3 %. Оксиды азота и монооксид углеводорода (CO) учитывать не будем вследствие их относительно малых количеств и слабого воздействия на кислотность среды.

Определим концентрацию нейтральных веществ в соединении: 78 % (азот) + 3 % (водяной пар) + 1,7 % (диоксид углерода) = 82,7 %. Концентрация окисляющих веществ составляет 17 %, восстанавливающих веществ 0,3 %. При этом сжатый воздух содержит азот (79 %), кислород (20 %), углекислый газ (1 %), т. е. 80 % нейтральных веществ и 20 % окисляющих. Далее определим, как изменится коэффициент α в формуле (4). На 17 % кислорода углеводородов из пропан-бутана потребуется 0,15725 м^3/ч. В 5 м^3/ч отработавших газов от дизельного ДВС содержится 0,14225 м^3/ч углеводородов. В результате получим новый коэффициент в формуле (4), который будет равен 0,02845, а формулу (4) можно записать следующим образом:

$$\alpha = 0{,}02845\frac{Q_{в}}{Q_{пб}}. \quad (5)$$

Аналогичный расчет проведем для работы плазмотрона на воздухе с природным газом. В этом случае используется природный газ стандартного состава (CH_4 95 %, H_2O + CO_2 5 %). При проходе через плазмотрон метан разлагается на метиленовый радикал $CH_3^{'}$ и водород $H^{'}$. При работе на воздухе с природным газом формула (5) приобретет следующий вид:

$$\alpha = 0{,}101\frac{Q_{в}}{Q_{п.г}}, \quad (6)$$

где $Q_{п.г}$ — количество природного газа, поступающего в смеситель перед плазмотроном, м^3/ч.

Таким образом, для получения нейтральной среды требуется 0,505 м^3/ч природного газа; в этом количестве восстанавливающая фракция составит 0,47975 м^3/ч. При переходе на горячие углеводороды от дизельного ДВС метана потребуется 0,4078 м^3/ч. Вычтем из восстанавливающей фракции количество оставшихся газов горячих углеводородов (получится 0,3928 м^3/ч). В пересчете на природный газ это будет составлять 0,4135 м^3/ч. Искомый коэффициент α в формуле (6) будет составлять 0,0827, тогда правомерно записать:

$$\alpha = 0{,}0827\frac{Q_{в}}{Q_{г.у}}, \quad (7)$$

где $Q_{г.у}$ — количество горячих углеводородов от дизельного ДВС, поступающих в смеситель перед плазмотроном, м^3/ч.

Таким образом, при работе мобильной многофункциональной плазменной установки на сжатом воздухе с горячими углеводородами от дизельного ДВС вместо пропан-бутана или природного газа необходимо учитывать измененные коэффициенты α в выражениях (4)–(7).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДОВ ПЛАЗМОТРОНА ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ

Эксплуатационные возможности любого плазменно-дугового устройства в значительной степени определяются ресурсной стойкостью электродов-катодов [28–33], которая, в свою очередь, зависит от их удельной эрозии. Поиск путей снижения удельной эрозии электродов ведется по нескольким направлениям. Одно из них связано со снижением температуры рабочей поверхности и плотности тока за счет применения материалов с низкой работой выхода, другое — с оптимизацией конструкции электрода, режима его охлаждения и тока, третье — с изучением и оптимизацией механизма эрозии электродов [34–37].

Электрод, используемый в плазмотронах плазменной установки, представляет собой обойму с закрепленной в ней осевой активной вставкой (рис. 2). В качестве материала обоймы обычно используют медь и ее сплавы (например, медь марок М1, М0). При этом активная вставка изготавливается из циркония, гафния или сплавов на их основе [16, 38]. Одной из особенностей электрода как композиционного материала является сравнительно небольшая площадь поверхности активной вставки, не превышающая, как правило, 2 % площади сечения всего электрода. Диаметр активной вставки обычно составляет 1–3,2 мм (в нашем случае он равен 2 мм).

Рис. 2. Электроды ЭП18Цр до лабораторных испытаний на мобильной многофункциональной плазменной установке

Возникший на рабочей поверхности электрода кратер образуется в результате эрозии не только активной вставки, но и охватывающей ее обоймы. По внешнему виду кратера можно судить о стабильности плазменного процесса и эксплуатационных характеристиках электрода. Размытый, несимметричный, с большим диаметром у рабочей поверхности кратер свидетельствует о недостаточном совершенстве процесса.

В табл. 1 приведены размеры эрозионного кратера электродов. Исследования эрозии обоймы электродов включали измерение глубины эрозионного кратера (с точностью до 0,1 мм) и определение эрозионной массы путем взвешивания электрода с точностью до 10^{-4} г. Объем кратера характеризовался его средним расчетным диаметром $D_к$ с учетом плотности компонентов и объема вставки. Унос материала электродов в процессе эксперимента контролировали методом слепка (с точностью до 5 %), а по окончании эксперимента — расчетом объема кратера по измерениям на микрофотографии продольного шлифа.

Результаты исследований показали (рис. 3), что форма кратеров у электродов воронкообразная до глубины 1,5 мм с последующим уступообразным переходом на цилиндрическую форму с диаметром, близким к диаметру вставки. Так, у электрода № 1 $D_к$ активной вставки значительно превышает $D_к$ электрода № 2. У электрода № 2 эрозия материала обоймы практически отсутствует, а отверстие от выработанной вставки имеет форму, близкую к цилиндрической. Кроме того, у электрода № 1 при работе на воздухе наблюдаются значительный унос материала обоймы, а также продольные и поперечные трещины. В целом структура эрозионной пленки и ее фазовый состав у обоих электродов идентичны.

Таблица 1. **Размеры эрозионного кратера электродов***

Электрод	Глубина кратера, мм	$D_к$, мм	Плазмообразующий газ
№ 1	3,7	3,1	Воздух
№ 2	3,2	2,8	Воздух + горячие углеводороды

* Материал обоймы и вставки Cu–Zr, число пусков 100.

Рис. 3. Электроды ЭП18Цр после лабораторных испытаний на мобильной многофункциональной плазменной установке: *а* — плазмообразующий газ (сжатый воздух); б — плазмообразующий газ (сжатый воздух) + горячие углеводороды от ДВС

Интенсивность эрозии катодов плазмотронов при воздушно-плазменном напылении преимущественно оценивается числом пусков (единичных циклов) в зависимости от глубины выгорания активной вставки [32]. В этой связи под ресурсной стойкостью понимается число пусков, соответствующее предельно допустимой глубине выгорания активной вставки. Известно [19, 39–41], что на ресурсную стойкость влияют конструкция электродов и химический состав обойм и вставки; не менее важное влияние на ресурсную стойкость электродов оказывает плазмообразующий газ. В табл. 2 приведены данные по ресурсной стойкости электродов ЭП18Цр плазмотрона ПУН-1УХЛ4, полученные при лабораторных испытаниях на мобильной многофункциональной плазменной установке (см. рис. 1).

Анализ полученных данных показывает, что ресурсная стойкость электродов ЭП-18Цр с циркониевой вставкой при работе с использованием плазмообразующего газа, в состав которого входят горячие углеводороды от ДВС, находится на уровне 180–200 циклов, тогда как стойкость таких же электродов при работе установки на плазмообразующем газе (сжатый воздух) составляет 110–120 циклов. Это можно объяснить снижением окислительных процессов в дуге при работе мобильной многофункциональной плазменной установки на плазмообразующем газе с восстановительной средой.

Установлено, что удельная эрозия электродов уменьшается с подачей в плазмообразующий газ горячих углеводородов от ДВС через модуль горючих газов мобильной многофункциональной плазменной установки.

Таблица 2. **Результаты испытаний электродов* на ресурсную стойкость**

Наибольший ресурс, цикл	Диаметр кратера, мм, при ресурсе				Плазмообразующий газ
	максимальном		среднерасчетном после		
	среднерасчетный	у рабочей поверхности	50 пусков	100 пусков	
115	3,6	4,3	2,7	3,3	Сжатый воздух
140	3,1	3,5	2,6	3,1	Сжатый воздух + + горячие углеводороды

* Материал активной вставки — цирконий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически обосновано применение горячих углеводородов от ДВС вместо пропан-бутана или природного газа при работе мобильной многофункциональной плазменной установки для восстановления и упрочнения деталей машин и оборудования.

2. Результаты исследований эксплуатационных характеристик электродов плазмотрона плазменной установки показывают, что использование ДВС в качестве источника горячих углеводородов для плазменной установки при восстановлении деталей машин и оборудования плазменным напылением с последующим оплавлением уменьшают окислительные процессы, возникающие в плазмотроне. В связи с этим возможно расширение использования смеси сжатый воздух + горячие углеводороды от дизельного ДВС в качестве плазмообразующего газа.

3. Улучшенные эрозионные свойства электродов достигаются за счет использования горячих углеводородов ДВС в качестве одного из составляющих плазмообразующего газа плазменной установки. Увеличение эрозионной стойкости позволит сэкономить дорогостоящие электродные материалы, повысить производительность плазменных установок за счет сокращения частоты смены электродов, а также удешевить процессы восстановления изношенных деталей машин и оборудования. Улучшение эксплуатационных характеристик электродов за счет снижения эрозии расширяет технологические возможности плазменных установок и обеспечивает получение продукции повышенного качества за счет уменьшения окислительных процессов в материале.

Библиографический список

1. ***Лоскутов, В. С.*** Процесс плазменного напыления как технологический метод обработки материалов / *В. С. Лоскутов, В. М. Рогожин, А. Ф. Пузряков* // Труды МВТУ. — 1977. — № 237, вып. 1. — С. 3–27.

2. ***Кудинов, В. В.*** Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / *В. В. Кудинов, В. М. Иванов*. — М. : Машиностроение, 1981. — 192 с.

3. ***Хасуи, А.*** Наплавка и напыление / *А. Хасуи, О. Моригаки* ; пер. с яп. В. Н. Попова ; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.

4. ***Кудинов, В. В.*** Нанесение покрытий плазмой / *В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белащенко* [и др.]. — М. : Наука, 1990. — 408 с.

5. ***Кудинов, В. В.*** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / *В. В. Кудинов, Г. В. Бобров*. — М. : Металлургия, 1992. — 432 с.

6. ***Сидоров, А. И.*** Эффективность плазменного напыления с последующим оплавлением / *А. И. Сидоров, С. В. Карцев* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2000. — № 12. — С. 20–23.

7. ***Пузряков, А. Ф.*** Теоретические основы технологии плазменного напыления / *А. Ф. Пузряков*. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 360 с.

8. ***Кравченко, И. Н.*** Способ плазменного нанесения антифрикционных износостойких покрытий на титановые сплавы / *И. Н. Кравченко, Ю. А. Кузнецов, А. В. Коломейченко, С. В. Карцев* // Сварочное производство. — 2019. — № 11. — С. 42–45.

9. ***Кравченко, И. Н.*** Высокоэффективные ресурсосберегающие плазменные технологии нанесения защитных покрытий / *И. Н. Кравченко, С. В. Карцев* // Научно-технический сборник. Вып. 10. — Балашиха : Изд-во ВТУ при Спецстрое России, 2005. — С. 87–94.

10. ***Калита, В. И.*** Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / *В. И. Калита, Д. И. Комлев*. — М. : Лидер М, 2008. — 388 с.

11. ***Соснин, Н. А.*** Плазменные технологии. Руководство для инженеров / *Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский*. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 406 с.

12. ***Кравченко, И. Н.*** Перспективные направления исследований и использования плазменных технологий в машиностроении / *И. Н. Кравченко, М. Н. Ерофеев, М. А. Глинский* // Трибология — машиностроению : Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. — М. : Ин-т компьютерных исследований, 2018. — С. 253–256.

13. ***Кравченко, И. Н.*** Ресурсосберегающие плазменные технологии при ремонте перерабатывающего оборудования / *И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, С. В. Карцев* [и др.]. — М. : ИНФРА-М, 2020. — 202 с.

14. ***Жуков, М. Ф.*** Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) / *М. Ф. Жуков, В. Я. Смоляков, Б. А. Урюков*. — М. : Наука, 1973. — 232 с.

15. ***Донской, А. В.*** Электроплазменные установки в машиностроении / *А. В. Донской, В. С. Клубникин*. — Л. : Машиностроение, 1979. — 222 с.

16. ***Коротеев, А. С.*** Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет / *А. С. Коротеев, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук*. — М. : Машиностроение, 1993. — 296 с.

17. ***Самотугин, С. С.*** Оптимизация конструкции плазмотрона для поверхностного упрочнения материалов / *С. С. Самотугин, И. И. Пирч, В. А. Мазур* // Сварочное производство. — 2002. — № 12. — С. 32–35.

18. **Пат. 14906 Республика Беларусь, МПК С 23 С 4/04**. Плазмотрон для нанесения покрытия / Оковитый В. А., Шевцов А. И., Девойно О. Г., Оковитый В. В. ; опубл. 30.10.2010.

19. ***Богданов, Ю. С.*** Дуговой плазмотрон для напыления и перспективы его использования в промышленности / *Ю. С. Богданов* // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. — 2010. — № 2. — С. 155–158.

20. ***Самотугин, С. С.*** Принципы усовершенствования конструкции плазмотрона для поверхностной упрочняющей обработки направляющих станков / *С. С. Самотугин, В. А. Гагарин* // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. — 2013. — Вып. 26. — С. 168–174.

21. ***Анахов, С. В.*** Методики расчета и проектирования плазмотронов для резки металлов / *С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин* // Сварочное производство. — 2019. — № 4. — С. 22–28.

22. ***Карцев, С. В.*** Мобильная плазменная установка для нанесения износостойких покрытий / *С. В. Карцев, И. Н. Кравченко, В. Ю. Гладков* // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. — СПб. : СПбПУ, 2004. — С. 215–220.

23. ***Кравченко, И. Н.*** Мобильная плазменная установка / *И. Н. Кравченко, С. В. Карцев, В. Ю. Гладков* // ЖКХ и строительство. — 2005. — № 3. — С. 58.

24. **Пат. 66341 Российская Федерация, МПК С 23 С 4/00**. Установка для плазменного напыления / Карцев С. В., Кравченко И. Н., Гурциев А, Ю. — № 2007113492/22 ; заявл. 11.04.2007 ; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 25.

25. **Пат. 92238 Российская Федерация, МПК Н 01 J 1/02.** Плазмотрон для плазменной наплавки / Карцев С. В. — № 2009123241/22 ; заявл. 18.06.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7.

26. ***Карцев, С. В.*** Состав отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / *С. В. Карцев, В. Н. Варламов* // Сборник научных трудов. Вып. 14. — Балашиха : Изд-во ВТУ при Спецстрое России, 2007. — С. 142–145.

27. ***Карцев, С. В.*** ДВС как источник горячих углеводородов для плазменных установок при упрочнении и восстановлении деталей машин / *С. В. Карцев, И. Н. Кравченко, В. Н. Варламов* // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2008. — № 1. — С. 11–13.

28. ***Амосов, В. М.*** Электродные материалы на основе тугоплавких сплавов / *В. М. Амосов, Б. А. Карелин, В. В. Кубышкин*. — М. : Металлургия, 1976. — 223 с.

29. ***Якименко, Л. М.*** Электродные материалы в прикладной электрохимии / *Л. М. Якименко*. — М. : Химия, 1977. — 264 с.

30. ***Гаврюшенко, Б. С.*** Исследование электродов плазмотронов / *Б. С. Гаврюшенко, А. В. Пустогаров* // Приэлектродные процессы и эрозия электродов : сборник. — Новосибирск : Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1977. — С. 85–122.

31. ***Жуков, М. Ф.*** Электродуговые генераторы термической плазмы / *М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский* [и др.]. — Новосибирск : Наука. Сибирское отд-ние РАН, 1999. — 712 с.

32. ***Карцев, С. В.*** Эксплуатационные характеристики электродов плазмотрона плазменной установки / *С. В. Карцев* // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2008. — № 7. — С. 29–31.

33. ***Кузнецов, В. Е.*** Электроды однофазных плазмотронов переменного тока и материалы для их изготовления / *В. Е. Кузнецов, А. А. Киселев, Р. В. Овчинников, Ю. Д. Дудник* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. — 2012. — № 2 (146). — С. 100–104.

34. ***Жуков, М. Ф.*** Эрозия электродов / *М. Ф. Жуков, А. С. Анытаков, Г.-Н. Б. Дандарон* // Приэлектродные процессы и эрозия электродов плазмотронов : сборник. — Новосибирск : Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1977. — 123 с.

35. ***Рычков, А. Д.*** Математическое моделирование процессов эрозии электродов в электродуговых генераторах низкотемпературной плазмы / *А. Д. Рычков, В. В. Саломатов* // Изв. Томского политехн. ун-та. — 2002. — Т. 305, вып. 2. — С. 61–66.

36. ***Субботин, Д. И.*** Исследование продуктов эрозии медного электрода плазмотрона переменного тока / *Д. И. Субботин, В. Е. Кузнецов, А. И. Литвякова* [и др.] // Журнал технической физики. — 2017. — Т. 87, № 11. — С. 1637–1640. DOI: 10.21883/JTF.2017.11.45122.2064.

37. ***Кузнецов, В. Е.*** Исследование эрозии электродов в плазмотронах постоянного и переменного тока / *В. Е. Кузнецов, А. А. Сафронов, В. Н. Ширяев* [и др.] // Прикладная физика. — 2019. — № 3. — С. 24–30.

38. ***Клименко, Г. К.*** Конструкции электродуговых плазмотронов [Электронный ресурс] / *Г. К. Клименко, А. А. Ляпин*. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

39. ***Дзюба, В. Л.*** Повышение эффективности работы плазмотрона для напыления / *В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов, В. С. Гаврыш* // Современные технологии, материалы, машины и оборудование. — Могилев : МГТУ, 2002. — С. 48, 49.

40. ***Виноградов, С. Е.*** Исследование механизмов износа электродов плазмотронов / *С. Е. Виноградов, В. В. Рыбин, Ф. Г. Рутберг* [и др.] // Вопросы материаловедения. — 2002. —№ 2. — С. 52–59.

41. ***Кузнецов, В. Е.*** Исследование способов увеличения ресурса электродов стержневого типа и времени непрерывной работы высоковольтных электродуговых плазмотронов переменного тока мощностью от 5 до 50 кВт / *В. Е. Кузнецов, Р. В. Овчинников, В. А. Сподобин* [и др.] // Изв. вузов. Физика. — 2007. — Т. 50, № 9-2. — С. 206–209. ■

Получено 02.07.20
© И. Н. Кравченко, С. В. Карцев, Ю. А. Кузнецов, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ