

# ПЛАЗМЕННЫЙ ИНЖЕКТОР ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сорокин А. Ф.<sup>1</sup>, Цюх А. М.<sup>2</sup>, Маслов В. И.<sup>2</sup>, Власенко В. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-производственное предприятие СТ "ТИАМАС", Евпатория

<sup>2</sup> Центр приема научной информации, НКА Украины, Евпатория-19, АР Крым

В данном докладе освещено применение плазменного инжектора в космических технологиях, использование в качестве двигателя при проведении микрокоррекций орбит космических аппаратов или основного двигателя микроспутника и осветителя спектральных приборов.

## 1. Введение

Известные преимущества плазменных технологий – простота управления всеми процессами, относительно малые габариты устройств, возобновляемость процесса получения плазмы — обусловили их широкое применение в космической отрасли. В связи с развитием микроспутниковых систем особый интерес может представлять класс торцовых малогабаритных ускорителей – рельсотронов (ТИМУР). Такие ускорители нашли широкое применение в лабораторной и промышленной практике и вполне могут применяться в космических условиях.

## 2. Основная часть

Схема устройства представлена на рис. 1. В нерабочем состоянии электроды 1 с испаряемыми вставками 2 сжимаются пружинами 3.

При подаче импульса напряжения  $U$  с длительностью  $\tau_{и}$  электроды расталкиваются силами взаимодействия антипараллельных токов. При достаточной инерции электродов в месте их точечного контакта происходит испарение и ионизация материала вставок, где в облаке пара образуется дуговой канал. По окончании импульса напряжения электроды схлопываются и устройство готово к очередному импульсу. Для исключения залипания электродов при соприкосновении собственное время колебаний системы токоподводов  $\tau_c = m^{1/2} k^{1/2}$  ( $m$  — приведенная масса токоподводов,  $k$  — коэффициент жесткости пружины), должно быть больше времени охлаждения электродов  $\tau_m$  до температур меньших температуры плавления материала вставок  $T_0$ :  $\tau_c > \tau_T = l^2 \chi^{-1}$ ,  $l = (IU\tau_{и})^{1/3} (c\rho T_0)^{-1/3}$ , где  $\chi$  — коэффициент температуропроводности;  $c$ ,  $\rho$  — удельная теплоемкость и плотность материала электродов соответственно,  $l$  — характерный размер электродных вставок.

В одном импульсе испаряется слой вещества с толщиной порядка скин-слоя, если выполняется условие  $IU\tau_{и} \geq (\pi c \rho d^2 l_3 T_u + d^2 l_3 \pi \rho v)$ , где  $d$  — диаметр катодного пятна,  $T_u$  — температура испарения материала вставки,  $v$  — удельная теплота испарения.

По заданным этим условиям величинам тока и действующим моментам сил упругости и Ампера выбирают минимальную длину токоподводов  $L$  согласно закона Ампера

$$\left\langle \frac{\mu_0 I^2 L^2}{4\pi b} \right\rangle \geq \langle f \Delta \varphi \rangle,$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость;  $b$  — расстояние между токоподводами ( $b \ll L$ ), минимизируемое при заданном напряжении по пробойной толщине изоляции,  $f$  — модуль сдвига материала токоподвода (для пружин — эквивалентная величина),  $\Delta \varphi$  — угол расхождения токоподводов.

Для более глубокого охлаждения электродов между импульсами и для исключения образования окисной пленки разряд проводится в потоке нейтрального газа (He, Ar, N<sub>2</sub>) или вакууме. При горении дуги условие равновесия сил упругости и магнитных обеспечивает самостабилизацию дуги. Вследствие малого расстояния между электродными вставками газокINETическое давление  $n k_B T$  оказывается меньше силы магнитного давления  $\mu_0 H^2 / 2$ , действующей на дуговой канал, что приводит к его МГД-ускорению без применения добавочных внешних магнитных полей.

Для упрощения конструкции инжектора в пробных экспериментах токоподводы изготавливались из упругой фольги (бериллиевая бронза, БРХ) толщиной 0.1–0.4 мм.

Изготовленное устройство имело длину 0.12 м и максимальный поперечный размер 0.008 м, что позволило использовать его, например, для восстановления покрытий на внутренней поверхности разъемов в заводских условиях.

В силу квадратичной зависимости силы взаимодействия между токоподводами от величины тока, линейной зависимости количества распыляемого материала от нее и слабого изменения  $\rho_s$  (0.5–1) для различных материалов, оказалось достаточным изменение  $L$  и внешних параметров цепи при перестройке системы от Al к таким радикально отличающимся материалами, как C и W (индуктивность  $L$  изменялась в пределах от 20 до 60 мкГн, напряжение  $20 < U < 300$  В, длительность импульса (формировался тиристорным ключом)  $5 \cdot 10^{-4} < \tau_{\text{и}} < 10^{-3}$  с). Эксперименты показали, что оптимальное (по максимуму распыляемого материала) значение тока составляет 0.3–0.4 кА при  $L = 10$  см,  $b = 0.01$  см (изолятор — лавсан). При больших токах наблюдается эрозия электродов с образованием питтингов, что объясняется пинчеванием разряда.

Для измерения некоторых параметров плазмы устройство размещалось внутри отрезка волновода 3-сантиметрового диапазона, возбуждаемого штыревой антенной и являющегося резонатором [5]. При расширении облака дуговой плазмы происходит перестройка эффективной длины резонатора (при электронной плотности  $n_e \geq 10^{13}$  см), и на измерительной антенне наблюдается максимум сигнала при прохождении плазмой пучности стоячей волны. Эксперименты показали, что скорость разлета отражающего фронта плазмы  $v_f > 10^5$  см/с и слабо зависит как от величины тока, так и от материала электродов. На расстоянии  $0.5\lambda \approx 2$  см ( $\lambda = 3$  см — длина СВЧ-волны) плотность плазмы быстро спадает (в большинстве экспериментов наблюдался всего один максимум), в

то время как толщина металла, напыленного на стенку волновода, заметно (примерно вдвое) спадает на расстоянии 3 см.

Большие скорости движения плазмы обеспечивают высокую адгезию покрытий при напылении различных материалов [4], что может использоваться в материаловедческих космических экспериментах. В земных условиях самостабилизирующаяся дуга применялась для напыления проводящего слоя на поверхность микроканальных пластин и в качестве источника плазмы для их калибровки [3].

Данное устройство может быть использовано в атмосфере, например в качестве осветителя спектральных приборов. В этом случае удобно работать в квазинепрерывном режиме, подавая напряжение питания с частотой, равной собственной частоте колебаний системы токоподводов. Спектр, возбуждаемый в такой дуге, по соотношению интенсивностей линий оказался близким к искровому, что показывает перспективность использования данного устройства в точечной спектроскопии тугоплавких материалов.

Такой осветитель можно применять для активной диагностики формы магнитных силовых линий в космосе. Для этого в качестве рабочего тела необходимо использовать материалы, атомы которых имеют метастабильные состояния и характеризуются большим каскадом переходов. Оценки показывают, что возможно наблюдение трассы плазмоида, излученного в космосе на высоте меньше  $10^3$  км с помощью наземного телескопа с  $R > 2$  м ( $10^5$  фотонов за импульс).

Малые энергоемкость и напряжение питания ( $\approx 100$  В), отсутствие этапа подготовки разряда, и сложной аппаратуры управления делает такой инжектор незаменимым в качестве двигателя при проведении микрокоррекции орбит космических аппаратов [6] или основного двигателя микроспутника. Экспериментально подтверждена эффективность работы отдельного модуля, состоящего из сопла Лавалья 5 (рис. 1) и инжектора, размещаемого в его критическом сечении. Создаваемый импульс при длине токоподводов 7 см и активной области 0.7 см измерялся на крутильных весах. Предельные значения импульса силы  $Fdt$  для различных рабочих тел приведены в таблице. Минимально достигнутый вес такого модуля составляет около 80 граммов. Приведены также основные характеристики слоев, напыленных на различные подложки. Расстояние от концов электродных вставок до мишени 0.003 м. Указано среднее число частиц, напыленных за единичный импульс на кварцевую подложку, рассчитанную по толщине слоя, определенной интерферометрическим методом, и численное значение твердости покрытий, измеренное стандартным методом. Измерение скорости коррозии в  $H_2S$  при различных температурах гравиметрическим методом показало высокую стойкость полученных покрытий [1].

Для определения плотности покрытия по глубине образец сканировался рентгеновским лучом дифракционного спектрометра с диаметром 6 мкм в направлении, перпендикулярном к слою. На рис. 2 показано распределение плотности по глубине покрытия (область II), пропорциональное ослаблению интенсивности луча ( $I/I_0 > 0.2$ ) в образце с шириной 0.003 м. В качестве подложки I использована фольга Ве толщиной

100 мкм. С увеличением толщины покрытий плотность падает, визуально наблюдается уменьшение чистоты поверхности. Видно, что Cr обладает большей адгезионной способностью, чем Al.

Исследование оптического спектра последовательно снимаемых слоев на стилоскопе СЛП-2 качественно подтвердило наличие внедряемого элемента в массе подложки до глубин 18 мкм. Для создания хромалюминиевых покрытий в одном импульсе электродные вставки делали из разнородных материалов Cr и Al (таблица, строка 6). Однако спектральный анализ показал преимущественное напыление атомов Al для всех типов мишени (15 % Cr и 60 % Al на подложке из Ст.3). Для увеличения содержания хрома в покрытии одна из электродных вставок изготовлена одновременным напылением хрома и алюминия (до толщины 100 мкм) на медную мишень. Таким методом удалось увеличить содержание Cr в покрытии до 25 % (таблица, строка 6).

### 3. Заключение

Проведенные эксперименты показали, что данное устройство позволяет получать разнородные покрытия, характеризующиеся высокими механическими и антикоррозионными свойствами: коэффициенты трения, близкие к трению при наличии смазки — углеродные покрытия; высокая устойчивость к коррозии при высоких температурах — (Al + Cr), достаточную твердость — W, что может представлять интерес при проведении ремонтных и сборочных работ в космосе. Использование инжектора как двигателя микроспутника может обеспечить заметное приращение его скорости ( $\sim 0.5$  м/с для  $P = 10$  кг).

1. Сорокин А. Ф., Захарова М. Я., Арутюнян К. А. *Плазмодинамическое устройство для нанесения локализованных покрытий* // *Машиноведение*. №5, 1987, с.117-118.
2. Сорокин А. Ф. *Дуговой источник частиц* // *Приборы и техника эксперимента*. №5, 1985, с.141-142.
3. Сорокин А. Ф. *Микроканальные пластины расширенного диапазона*. Тез. докл. конф. «Визуализация рентгенодифракционных изображений дефектов в кристаллах». Ереван, 1983. С.5.
4. Сорокин А. Ф., Ан В. Б. *Способ локализации коррозионных повреждений*. Тез. докладов. «Защита от коррозии в химических отраслях промышленности». Черкассы. 1985, С.115-120.
5. Осипов Н. А., Сорокин А. Ф. В кн.: *Программа и аннотации докладов совещания по диагностике высокотемпературной плазмы*. Сухуми: СГУ, 1970, кн. 5, с.62.
6. Сорокин А. Ф. *Электрореактивный двигатель рельсотронного типа* // *А.С. СССР № 1626769*.

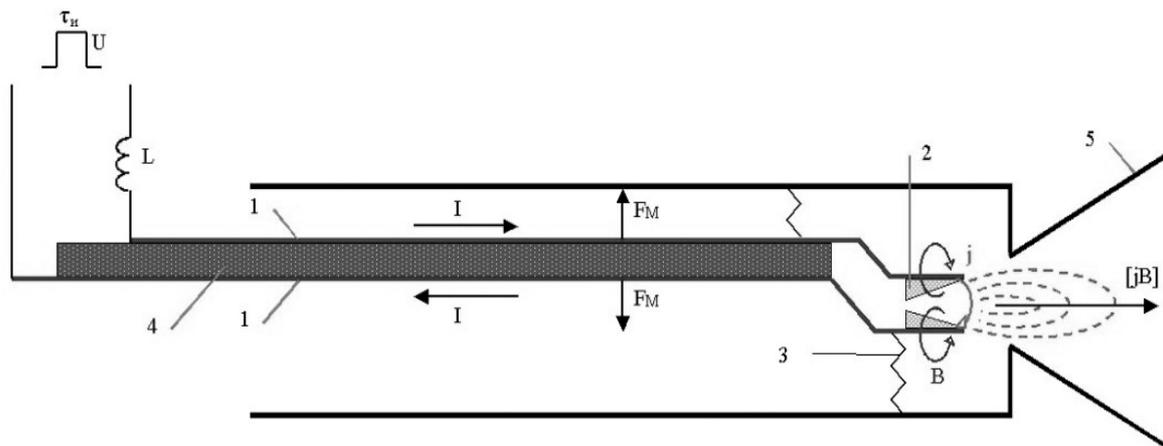


Рис. 1. Схема плазменного инжектора

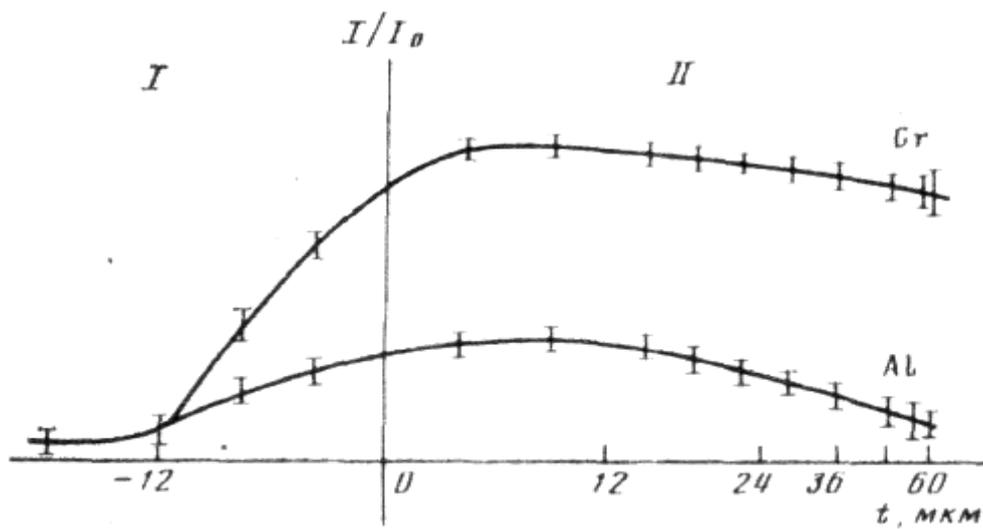


Рис. 2. Распределение плотности покрытия по глубине

Характеристики плазменного инжектора для разных материалов вставок

Напыляемый материал (подложка)	Предельные значения импульса силы $Fdt$	Число частиц, распыля- емых за импульс (опти- мальный ток разряда)	Твердость НВ (толщина слоя), мкм
Ni (кварц, ст.3, латунь)	0.05	$3 \cdot 10^{17}$ (0.1 кА)	290 (60)
C (кварц, ст.3)	0.02	$5 \cdot 10^{18}$ (0.05 кА)	12-15 (40)
Cr (ст.3, кварц)	-	$10^{18}$ (0.8 кА)	420 (30)
Al (кварц)	0.01	$10^{18}$ (0.4 кА)	40 (30)
W (кварц)	-	$2 \cdot 10^{17}$ (0.6 кА)	380 (30)
(Al+Cr)+Cr (кварц, ст.3)	-	$3 \cdot 10^{17}$ (0.4 кА)	230 (30)
Ti+H	0.2	$3 \cdot 10^{19}$ (0.4 кА)	-